

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

Année 1970

No

27

THÈSE

POUR LE

DOCTORAT EN CHIRURGIE DENTAIRE

(Thèse de 3^{ème} cycle)

par

Pierre DELUARD

Né le 13 Septembre 1930 à Le Mans

Présentée et soutenue publiquement le

VERS UNE ÉTUDE STRUCTURALE MODERNE DES ALLIAGES MÉTALLIQUES, PORCELAINES ET POLYMETACRYLATES

Présent et avenir de leur contrôle non destructif

Président de Thèse : Monsieur Pierre CERNEA (Professeur)

DACTYLO-SORBONNE

8, Rue Casimir-Delavigne

PARIS 6^e

1970

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

Année 1970

N°

THÈSE

POUR LE

DOCTORAT EN CHIRURGIE DENTAIRE

(Thèse de 3^{ème} cycle)

par

Pierre DELUARD

Né le 13 Septembre 1930 à Le Mans

Présentée et soutenue publiquement le

VERS UNE ÉTUDE STRUCTURALE MODERNE DES ALLIAGES MÉTALLIQUES, PORCELAINES ET POLYMETACRYLATES

Présent et avenir de leur contrôle non destructif

Président de Thèse : Monsieur Pierre CERNEA (Professeur)

DACTYLO-SORBONNE

8, Rue Casimir-Delavigne
PARIS 6°

1970



A Françoise
mon épouse

Dont la collaboration et la
compréhension me furent précieuses

En souvenir de mon père
Henri DELUARD
Docteur en pharmacie

A Monsieur le Professeur P. CERNEA

Professeur à la Faculté de Médecine de Paris

Membre de l'Académie de Chirurgie

Officier de la Légion d'Honneur

Qui nous a fait l'honneur d'accepter
la présidence de cette thèse

En hommage de respectueuse reconnais-
sance

A Monsieur le Professeur P. CERNEA

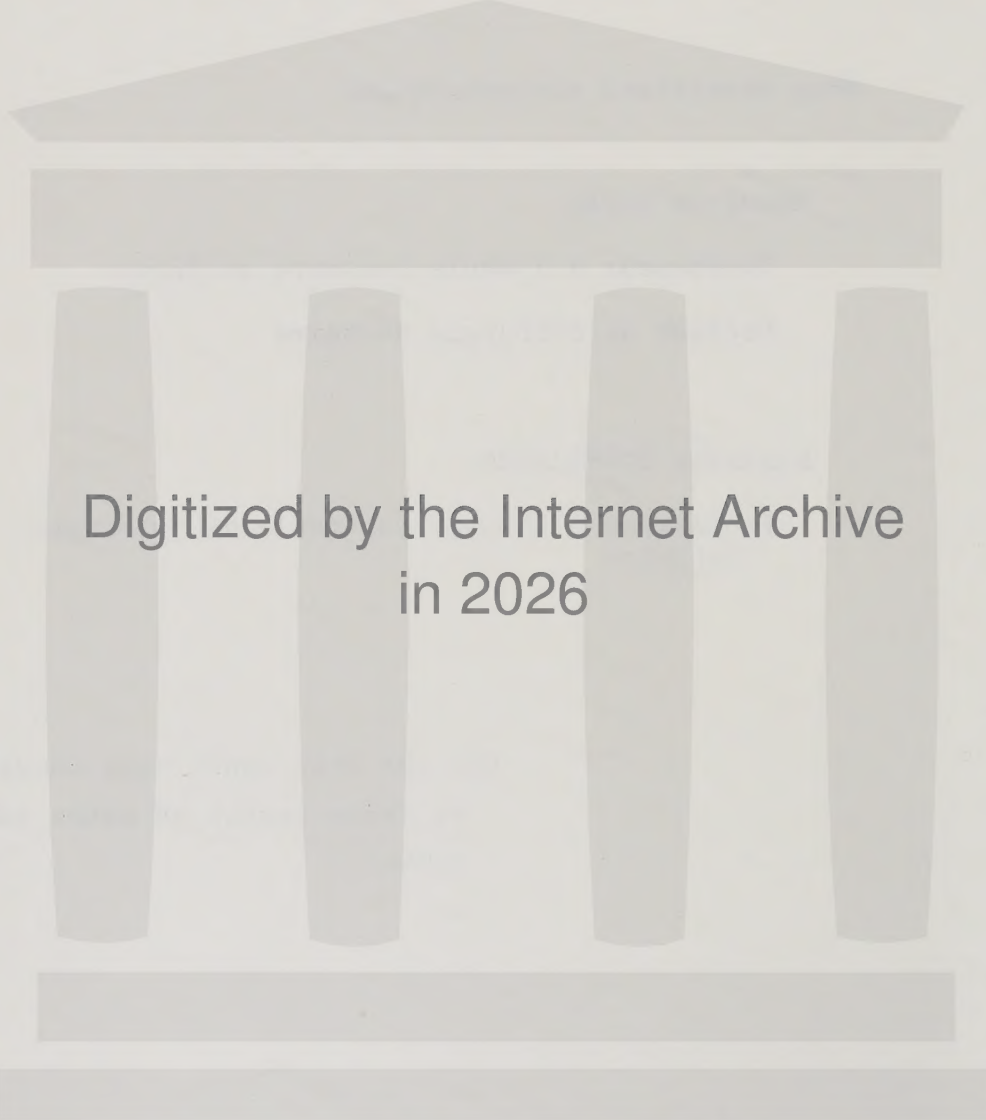
Professeur à la Faculté de Médecine de Paris

Membre de l'Académie de Chirurgie

Officier de la Légion d'Honneur

Qui nous a fait l'honneur d'accepter
la présidence de cette thèse

En hommage de respectueuse reconnais-
sance



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41550207_0031

VERS UNE ETUDE STRUCTURALE MODERNE
DES ALLIAGES METALLIQUES, PORCELAINES
ET POLYMETACRYLATES

Présent et avenir de leur contrôle non destructif

-:-

S O M M A I R E

--:-

	<u>Pages</u>
<u>INTRODUCTION</u>	2
<u>CHAPITRE I - Quelques rappels et notions modernes</u> <u>sur la constitution de la matière</u>	4
- L'atome	5
- La molécule	8
- Les réseaux	9
- Les solutions cristallines	12
<u>CHAPITRE II - Défauts de nos matériaux</u>	15
- Défauts des alliages métalliques	16
- Défauts des résines	30
- Défauts des porcelaines	33
<u>CHAPITRE III - Détection des défauts</u>	37
- Méthodes destructives	37
" non destructives	39
- ultra-sons	40
- effets magnétiques	41
- vernis photo-électriques	44
- vernis craquelants et jauges de contrainte	45
- les rayons Y	45
- Radiographie	46
- Le ressuage	49
<u>CHAPITRE IV - Expériences</u>	54
- La démarche	54
- Essais de fatigue	55
- Les tests	56
- Discussion des expériences	61
<u>CONCLUSION</u>	64
<u>VERS L'AVENIR</u>	

INTRODUCTION

-:-

Il arrive qu'une prothèse fixe ou mobile casse alors qu'elle a été conçue parfaitement dans l'espace, que les forces masticatoires s'y appliquent normalement et que son infrastructure respecte les piliers, la muqueuse, le périodonte et l'os.

On ne peut alors qu'incriminer la texture même du matériau, et rechercher un défaut qui peut être inhérent à sa structure ou découler de sa façon.

Il va de soi qu'aucun praticien ne posera en bouche une prothèse qui porte un défaut apparent de structure. Notre ambition est de permettre à chacun de déceler d'une façon facile et relativement rapide tel défaut microscopique qui peut entraîner la cassure.

Nos expériences ont été nombreuses et sans concession. Elles ont été reprises maintes fois en changeant les paramètres. Jamais n'a été donné le coup de pouce sur le plateau de la balance mais par contre nous ne publions pas les expériences manquées par faute de technique, erreurs, fausses données. Le nombre incalculable de ces bévues nous permet d'atteindre une technique de plus en plus sûre ; leur énumération ne servirait à rien, sauf peut-être à fortifier notre humilité.

Il nous a paru logique, avant de livrer la "recette", de rappeler brièvement en quoi consistent les défauts présentés par nos matériaux prothétiques. Nous étudions la constitution de la matière, insistant seulement sur les données les plus modernes ou les éléments qui déterminent à plus ou moins long terme les qualités des matériaux que nous employons.

La fissure que nous détecterons et qui engendrera la cassure a son origine à l'échelle du cristal. Nous sommes dès lors condamnés à remonter la filière.

Que ceux qui connaissent bien la structure de ces matériaux se reportent de suite au Chapitre 3. Ainsi peuvent faire également ceux qui, faute de temps, seraient intéressés uniquement par le côté pratique de cette étude.

Après tout, ils sont nombreux ceux qui regardent la télévision sans en comprendre le principe et, tout en se privant d'une grande joie, ils ne s'en portent pas plus mal.

CHAPITRE I

-:-

QUELQUES RAPPELS ET NOTIONS MODERNES SUR LA CONSTITUTION DE LA MATIERE

-:-

Qui placera en bouche une coiffe métallique présentant un "trou" visible à l'oeil nu ou une résine présentant une fissure visible en transparence ? Pourtant nous plaçons tous des prothèses contenant des milliards de "vides" au mm² et chacun s'en trouve bien.

Ainsi le veut la constitution de la matière. En effet l'atome peut être représenté à l'échelle humaine par un noyau gros comme une bille pour enfant placée à l'obélisque autour duquel les plus proches électrons sont représentés par des têtes d'épingles orbitant à l'arc de Triomphe. Cette représentation imagée montre combien la matière est "vide".

Il semble, de plus, que ce monde connu doive être abordé avec humilité car les chercheurs du radiotélescope de Nançay ont découvert en 68 que les fameux "Pulsars" sont des étoiles très petites, de quelques kilomètres de diamètre et pesant n millions de tonnes au cm³. Quelle est alors la structure de leurs atomes ? Sur la terre, si l'on pouvait condenser à les faire toucher tous les éléments d'un atome, et les atomes eux-mêmes les uns aux autres, une tête d'épingle pèserait 500 millions de tonnes.

C'est dire assez qu'entre la macroscopie et le royaume atomique, toute une gamme de défauts peuvent surgir dont les uns confinent à la catastrophe et les autres au domaine du normal.

L'or, le papier, l'eau, tous les matériaux quels qu'ils soient, sont composés de la même matière : un assemblage d'atomes eux-mêmes constitués de la même matière : un noyau et des électrons, eux-mêmes également constitués. Seuls le poids et la charge électrique du noyau, la distribution de ses éléments, le

nombre, la charge et la trajectoire des électrons font que la réunion des atomes sera de l'or, du papier, de l'eau, etc ...

I - L'atome

La représentation graphique classique de l'atome est encore présente à l'esprit de chacun. Le noyau au centre de cercles concentriques qui peuvent être au nombre de 7. Le plus petit de ces cercles porte au maximum 2 électrons. Le 2e cercle peut en porter 8, le 3e 18, le 4e 32, etc ...

Le cercle le plus externe, qui peut être le 2e, 3e, 4e, etc.. n'est pas forcément entièrement garni.

Chaque électron porte une charge électrique négative e (pour H, $e = 4,8 \times 10^{10}$ unités CGS). Le noyau porte une charge positive $Z e$ car il porte Z protons de charge positive et de même grandeur que e ; l'atome isolé est donc électriquement neutre.

Mais les atomes de nombreux éléments peuvent être portés dans un état où la charge positive du noyau n'est plus neutralisée, ce sont les "ions", positifs si n électrons ont été enlevés, négatifs si n électrons ont été ajoutés.

Les cercles concentriques sur lesquels tournent les électrons sont appelés K pour le plus petit, L pour le suivant, puis M, N, O, P, Q.

Cette représentation graphique était utile car elle parle à l'esprit et permet de se faire une idée primaire de la réalité atomique. Mais il en est là comme pour les mathématiques modernes, il faut tout oublier et repartir à ... presque zéro sous peine d'être vite arrêté dans la compréhension des phénomènes chimiques et physiques.

Par exemple la notation du modèle atomique de Bohr par les lettres K, L, M ... n'est plus guère employée que dans la nomenclature des rayons X où les différentes raies du spectre sont nommées d'après la couche électronique où elles trouvent leur origine. Ainsi une place vide dans la couche K ($n-1$) peut être occupée par un électron de la couche L ou M $\Rightarrow$ l'émission des raies K α et K β du spectre x.

Structure des atomes - Les Quanta -

On admet actuellement que le mouvement des électrons n'est pas lié à des orbites bien déterminées, l'ensemble des électrons constituant un "nuage" diffus. Pourtant l'état de mouvement d'un électron ne peut varier d'une manière continue mais est fixé par certains nombres quantiques.

On distingue 4 nombres, désignés par n , l , ml , ms , qui caractérisent :

- n : le rayon de l'orbite
- l : la forme de l'orbite
- ml : la pente de l'orbite
- ms : le "spin" de l'électron

n) (= 1 à 7) : Les couches possibles sont celles où le moment angulaire de la quantité de mouvement d'un électron est égal à un multiple entier de

$$\frac{h}{2\pi} \quad (h = \text{constante de Plank} = 6,55 \times 10^{-27} \text{ ergs/s})$$

$$\text{Donc } \frac{h}{2\pi} \Rightarrow n=1, \frac{2h}{2\pi} \Rightarrow n=2, \text{ etc ...}$$

1) c'est le quantum azimuthal qui détermine l'excentricité de l'orbite - l est toujours un nombre entier variant entre 0 et $n-1$ (si $l = n \Rightarrow$ cercle)

ml) ses seules valeurs possibles sont $-l, 0, +l$ - Il détermine la composante du moment angulaire selon l'axe d'un champ magnétique extérieur, donc l'inclinaison du plan de l'orbite. Nous retrouvons à cette échelle la bonne vieille règle des trois doigts : champ, courant, force.

ms) Ne peut avoir pour valeur que $+\frac{1}{2}$ ou $-\frac{1}{2}$ et donne la composante angulaire due au pivotement de l'électron, c'est le "spin" - 2 électrons ayant même valeur de ms ont leurs spins parallèles, sinon leurs spins sont antiparallèles.

L'état de mouvement de chaque électron, complètement déterminé par les quatre nombres quantiques est obligatoirement différent de l'état de mouvement de tous les autres électrons

du même atome. Donc deux électrons du même atome ne peuvent avoir leurs quatre nombres quantiques identiques.

C'est en un court résumé le principe d'exclusion de Pauli.

Les propriétés chimiques des éléments sont intimement liées à la constitution de la couche électronique externe, celle qui correspond à la plus grande valeur de n .

a/ Les éléments dont la couche externe est constituée de 8 électrons sont très stables. Ce sont les gaz rares - ex.: Le Radon (2) (8) (18) (32) (18) (8)

b/ Les éléments dont la couche externe comprend 1 électron sont très réactifs car ils sont tout prêts à céder cet électron, ce sont les métaux alcalins.

ex. : - Sodium (2) (8) (1)
- Potassium (2) (8) (8) (1)

c/ Les éléments auxquels il manque un électron pour que la couche externe soit complète ont tous des propriétés semblables, ce sont les Halogènes.

ex. : Chlore (2) (8) (7)
Iode (2) (8) (18) (18) (7)

On voit combien il est facile à Na de s'allier à Cl par exemple.

Les éléments dont les configurations électroniques sont complémentaires peuvent former des combinaisons chimiques.

La porcelaine dentaire est un mélange de combinaisons chimiques. Les plastiques (dont la résine) sont des compositions chimiques complexes à type macromoléculaire.

Les alliages métalliques, sauf cas particuliers, nous le verrons, ne sont pas des compositions chimiques. On ne peut en donner la formule chimique. Ce sont des conglomerats de cristaux de divers éléments fondus ensemble. La constitution du cristal, la façon dont les cristaux s'assemblent, la teneur en chacun des éléments, les traitements thermiques, conditionnent les propriétés de l'alliage.

II - La Molécule

1) Liaison ionique ou hétéropolaire

Le composé chimique Na + F dont la plus petite particule unitaire est la molécule Na F résulte du fait que Na (2) (8) (1) cède son électron de valence à F (2) (7). La 3e couche de chacun des deux atomes est alors constituée par un groupe complet de 8 électrons. Il se forme un ion positif et un ion négatif liés par attraction électrostatique (voir dessin, fig.1).

2) Liaison de covalence ou homopolaire

C'est souvent le cas des atomes identiques qui forment une molécule. L'atome de F qui a 7 électrons en sa couche externe, s'allie à un frère de telle sorte qu'ils possèdent chacun 6 électrons non communs et 2 électrons communs. La molécule est F₂ - (voir dessin, fig.2).

Il ne peut se former une liaison homopolaire entre 2 atomes de même nature que si dans les paires d'électrons communs les spins sont antiparallèles.

Le seul cas où l'on puisse parler de molécule pour les alliages est le cas des composés intermétalliques que l'on rencontre dans les "ors transformables" parfois appelés à tort "autotremnants". Cette notion est très importante et sera étudiée plus loin.

3) Classification moderne

On a maintenant tendance à considérer la matière sous deux formes : la matière non cristallisée, donc amorphe, qui comprend par exemple les gaz dont les atomes sont animés de mouvement Brownien ; la matière cristallisée, formée de cristaux. Le cristal ou "grain" est un assemblage régulier, périodique, d'atomes répartis dans 3 directions selon des motifs qui se répètent dans l'espace de manière périodique pour former la maille. On trouve alors diverses sortes de cristaux :

a) cristaux homopolaires : ex.: Cl_2 , H_2 , oxydes, silicates, etc...

b) " hétéropolaires : formés par attraction entre ions positifs et négatifs avec transfert d'électrons -
ex. : F^- et $\text{Na}^+ \rightarrow \text{F Na}$

- c) cristaux moléculaires : formés d'atomes inertes ou de molécules neutres, liés par des forces de Van der Wals
ex. : la plupart des composés organiques.
- d) " métalliques : Entre ions positifs - L'attraction des ions positifs et des électrons stabilise la structure.
Les électrons se déplacent facilement dans le réseau et sous l'influence d'un champ peuvent vibrer $\Rightarrow$ courant électrique.
Les ions ne peuvent se déplacer au sein du cristal et si l'attraction est trop grande les cristaux se déplacent (électrolytes).

III - Les cristaux métalliques ou réseaux

Les atomes sont distribués de façon régulière dans le cristal suivant 14 manières différentes.

Tous nos métaux précieux cristallisent en réseau cubique à face centrée ; cr, Mn, Mo qui entrent dans la composition des stellites cristallisent dans le système cubique centrée ; Co qui en est le constituant le plus important cristallise dans le système hexagonal. Nous pouvons donc pour notre part considérer seulement ces 3 types de réseaux dont la représentation dans l'espace figure, fig.3-4-5.

Ce qui suit va nous aider à comprendre les qualités et défauts de nos alliages. En effet l'étude systématique des plans de glissement est relativement récente et éclaire d'un jour nouveau les phénomènes de déformation.

Indices de Miller -

Les atomes oscillent autour d'une position moyenne et leur distance respective est appelée paramètre a. Chaque angle du cristal est appelé noeud (voir dessin, fig.6).

Toute droite (par exemple 1-2) reliant 2 noeuds du réseau en rencontre une infinité. Tout plan déterminé par 3 noeuds est

dit plan réticulaire ou plan cristallographique ; il passe, bien sûr, par une infinité de noeuds puisque les cristaux se touchent.

Dans un système d'axes rectangulaires axyz les plans cristallographiques sont déterminés par des indices.

Selon une convention universelle, les indices des plans coupant les axes ox, oy, oz en des points de coordonnées m, n, p sont les plus petits nombres entiers h, k, l, proportionnels à :

$$\frac{1}{m} , \frac{1}{n} , \frac{1}{p}$$

Par exemple le plan 1-2-3-4 qui est une face du cube et tous les plans parallèles, coupent les axes ox, oy, oz en des points de coordonnées : ∞ , ∞ , a -

On a donc :

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{\infty} , \frac{1}{n} = \frac{1}{\infty} , \frac{1}{p} = \frac{1}{a}$$

et comme valeur de h, k, l : 0, 0, 1

Les indices de ces plans sont (001)

De la même manière les 3 familles de plans parallèles aux faces du cube ont les indices (001), (010), (100).

Dans le système cubique le plan diagonal 1,6,8 a un rôle très important, son indice est (111), c'est le plan le plus fourni en atomes. Autour de lui s'orienteront les glissements, c'est le plan de l'octaèdre.

Qualités plastiques suivant la forme du cristal

1) Réseau cubique à faces centrées (fig.4)

Tous les métaux précieux + Fe, Cu, Ni, Al ... on voit à la fig.4, 8 atomes aux sommets + 1 atome au centre de chacune des 6 faces. Y a-t-il donc 14 atomes, par cristal ? non car chaque cristal est inclus dans un bloc formé de cristaux semblables et par conséquent chaque atome au sommet est commun à 8 cristaux et que l'atome au centre de chaque face est commun à 2 cristaux.

Donc chaque cristal contient $(8 \times \frac{1}{8}) + (6 \times \frac{1}{2}) = 4$ atomes propres. Les plans octaédriques, par exemple le plan (111) déjà vu, comprend 6 atomes, c'est le plus garni.

Ce type de cristal présente ainsi une grande compacité atomique, la distance inter-atomique étant courte et égale à $a \frac{\sqrt{2}}{2}$.

Il y a 4 plans octaédriques de glissement à empilage compact et 12 rangées à empilage compact, ce qui explique que les métaux de ce groupe présentent de multiples possibilités de glissement et une grande aptitude à la déformation plastique.

2) Réseau cubique centré (fig.3)

8 atomes aux sommets
+ 1 atome au centre

Donc $(8 \times 1/8) + 1 = 2$ atomes propres. La structure est donc aérée. Les plans sont moins compacts et la distance inter-atomique est égale à $a \frac{\sqrt{3}}{2}$.

Les qualités plastiques sont moins bonnes, c'est le royaume de la dureté (Fe α , Cr, V, Mo, ...).

3) Réseau hexagonal (fig.5)

La déformation, comme toujours, se produit parallèlement aux plans à répartition dense. Il y a 6 atomes propres. Le paramètre a est le côté de l'hexagone et c est la hauteur. La distance inter-atomique minima est

$$\sqrt{\frac{a^2}{3} + \frac{c^2}{4}}$$

et si $c/a = 1,633$ la distance = a ; c'est alors le réseau hexagonal le plus compact possible.

Ce réseau présente une seule famille de plans de glissement : l'ensemble des plans de base (alors que le réseau cubique à faces centrées a 4 familles). Les qualités plastiques sont donc limitées (Mg, Zn, Co, Cd ...).

Disons maintenant que si les efforts physiques externes ou les tensions internes s'appliquent en des directions différentes des plans de glissement, un "défaut" ne peut manquer d'apparaître.

IV - Les différentes solutions cristallines

Il ne s'agit pas d'un cours et nous supposons connus et assimilés les mécanismes et diagrammes de fusion et leurs conséquences. Nous proposons seulement une classification un peu différente de celle que l'on propose habituellement aux étudiants et aux praticiens. Cette classification doit permettre d'imaginer clairement de quelle façon les éléments de nos alliages sont liés.

Disons d'abord que seules les solutions solides nous intéressent, les autres formes d'alliage étant inutilisables pour nous.

Un ou plusieurs atomes de l'élément dissous entrent dans le cristal de l'élément solvant :

- si le type de réseau n'est pas modifié, on parle de solution solide primaire
- si le type de réseau est modifié, on parle de solution secondaire.

Dans ce second cas la répartition des atomes peut être ordonnée et si les constituants sont respectivement électropositifs et électronégatifs, la phase intermédiaire est parfaitement définie comme dans une combinaison chimique (composés intermétalliques ou composés définis).

Nous classerons les solutions solides en différents types :

- solution d'insertion
- solution de substitution
- solution de substitution ordonnée
- phase intermédiaire de composition définie
- composé interstitiel.

1) Solution d'insertion

Ici l'atome dissout occupe les interstices du réseau du solvant. Il faut donc que ces intrus soient très petits par rapport aux atomes du solvant pour prendre place sans rien déranger. C dans Fe γ en est un exemple (nos partiels en acier estampé). Le réseau de figure 4 devient celui de la figure 7.

Mais un problème se pose : l'expérience montre que le carbone peut se dissoudre dans le Fer γ jusqu'à un maximum d'environ 1,7 et pas plus, pourquoi ? Faisons un calcul simple en nous rappelant que le cristal à faces centrées contient 4 atomes propres : si chaque cristal contenait en son centre un atome de carbone, la solubilité serait (fig.7) :

$$\frac{C}{4 \text{ Fe} + C} = \frac{12}{236} = 5,1 \%$$

car le poids atomique de C $\neq$ 12 et celui du Fer $\neq$ 56

Nous pensons pour notre part que le cristal de fer γ est déformé par l'insertion d'un atome de carbone ; sa déformation en épaisseur contraint les voisins de telle sorte qu'un cristal sur trois environ peut recevoir un atome de carbone.

Cette opinion semble confirmée par le fait que la proportion d'admission baisse encore en même temps que la température. La chaleur en effet donne une certaine liberté aux atomes et donc une sorte d'élasticité aux réseaux.

D'après HUME-ROTHERY on ne peut avoir de solution d'insertion que si le rapport des diamètres des atomes se trouve compris entre 0,41 et 0,59.

C'est dire que les métaux ne peuvent pas en former entre eux car leurs diamètres atomiques diffèrent trop peu.

2) Solution de substitution

Un ou quelques atomes du solvant sont remplacés par un même nombre d'atomes de l'élément dissous. Le réseau est alors perturbé, entraînant un durcissement.

On a des solutions solides primaires si la différence de diamètre n'excède pas 15 %.

3) Solution de substitution ordonnée

Dans les solutions précédentes, la distribution des atomes est arbitraire ou désordonnée. Mais parfois les atomes dissimilaires occupent des positions symétriques (fig.8 et 9).

Les atomes différents sont dans des proportions simples ($1/1$; $1/3$, $2/1$, etc ...) c'est le cas de nos alliages cuivre-or dits transformables où l'abaissement de température favorise l'ordre et l'augmentation de température le désordre.

Le cristal de la fig.9 ne peut s'obtenir que pour un pourcentage déterminé et entre deux températures précises.

Même la densité varie. Elle augmente avec l'ordre, ce qui est facile à comprendre : une valise bien rangée ne contient-elle pas davantage d'objets ? L'ordre provoque un durcissement sensible, la limite d'élasticité et la dureté croissent.

Nous verrons plus loin comment on les obtient dans la pratique, les défauts inhérents à leur nature et que nous détecterons ... sans parler de leurs multiples avantages.

4) Phases intermédiaires

Parfois lorsque la teneur en un des éléments change, on a des solutions définies mais intermédiaires. Le caractère en est homopolaire, et c'est ce qui les distingue d'une combinaison chimique véritable. De plus, le corps obtenu garde les propriétés de ses composants, contrairement à Na Cl par exemple où l'on ne retrouve ni les propriétés de Na, ni celles de Cl.

CHAPITRE II

-:-

CONSTITUTION DE NOS MATERIAUX DEFAUTS ISSUS DE LEUR STRUCTURE, DE LEUR FACON, DE LEUR USAGE

-:-

Il est curieux de constater que parmi nos matériaux, ceux dont la constitution semble la plus simple et dont la réalisation remonte au plus loin, sont aussi ceux qui posent les plus délicats problèmes, dont l'étude est la plus difficile et dont les améliorations sont les plus lentes.

Les alliages métalliques sont connus et obtenus depuis ... l'âge de bronze, la porcelaine est connue en Europe depuis le 19e siècle, les premières résines en 1914 et les résines utilisables en art dentaire en 1939 !

Nos trois matériaux semblent pourtant être arrivés à un même stade de perfection. Cette contradiction se trouve résolue lorsqu'on se rappelle la constitution de ces trois matériaux. Cette constitution nous amènera aux possibilités de défauts inhérents à la nature de chacun, puis à la possibilité de détecter ou non ces défauts.

Dans le chapitre précédent nous avons pris en exemple de constitution de la matière le cristal métallique. Nous avons vu comment dans un alliage les atomes des constituants pouvaient former un nouveau cristal ; il n'est donc pas utile d'y revenir. Mais la température de fusion, la vitesse de chauffe et de refroidissement, la pression, les impuretés, le nombre quasi-infini des constituants possibles, etc... font de l'alliage au stade de sa conception puis de sa réalisation une étude extrêmement complexe dont le diagramme ternaire, véritable casse-tête pour le vulgaire, n'est que l'alphabet.

De plus, dans la pratique de la confection des alliages, les courbes réelles ne coïncident jamais avec les courbes mathématiques idéales et des livres entiers sont écrits périodiquement

pour en chercher les causes.

C'est ainsi que nos alliages s'améliorent peu à peu jusqu'à nos merveilleux ors transformables.

Les stellites découverts par l'industrie, très vite utilisés dans notre art, trouvent ces derniers temps des débouchés industriels de plus en plus nombreux et ne peuvent qu'y gagner en diversité et qualité.

La détection des défauts de nos prothèses fera l'objet du chapitre suivant. Toutefois il semble naturel d'essayer de voir d'abord avec précision l'origine de ces défauts. Ces défauts seront toujours un manque ou un déplacement de matière sous diverses formes, divers noms et diverses origines.

Il faut donc, à la lumière de conceptions récentes sérier dans chacun de nos matériaux la façon dont on arrive à un produit "normal" et la possibilité ainsi que le pourquoi des défauts.

Les résines et les porcelaines présentent des défauts que l'on retrouve grosso-modo dans les alliages métalliques (quoique les causes en soient différentes) ces derniers ont en plus leurs défauts propres, de telle sorte que leur étude en sera plus complète.

I - Défauts des alliages métalliques

Poser le problème c'est aussi se demander quelles en sont les qualités. De même que pour une voiture la vitesse engendre la fragilité ou au minimum le défaut d'être chère, de même la recherche de qualités additionnées donne à nos matériaux une marge d'erreur de plus en plus réduite et le fabricant, autant que le prothésiste, marche souvent sur la corde raide, cotoyant le goufre ... disons la crique, la géode, la fissure, la tapure, la porosité, etc...

A) Défauts de structure

1) Les Aciers : considérés au stade de la prothèse terminée, neuve ou usagée, les défauts peuvent être classés en défauts internes et défauts débouchant à la surface. Cette classification sera primordiale au stade de la détection.

Du point de vue de la structure, les défauts internes ou externes ont les mêmes origines et peuvent être classés en défauts de conception (le choix des matériaux par exemple étant inacceptable) de fusion, de solidification, de traitement thermique, de coulée, par déformation plastique, dûs au milieu d'utilisation.

En résumé la conception, la façon et l'usage peuvent être causes de défauts dont l'aspect, nous le verrons, n'est pas très différencié mais dont l'origine et la structure microscopique font partie de deux mondes différents.

Nos manuels spécialisés abordent généralement le chapitre de l'acier sur la pointe des pieds. Ou bien on le laisse aux spécialistes tant sa complexité est grande, ou bien on donne d'un coup un diagramme très ardu, isolé, qui n'apporte généralement que l'envie de tourner la page.

Il nous a paru nécessaire de comparer 3 diagrammes simplifiés de solidification permettant d'un seul coup d'oeil de comprendre combien peut facilement se former un défaut si l'on s'écarte un tant soit peu de la ligne idéale. Les propriétés allotropiques du fer sont la cause de changements d'états à des températures parfois très proches et que nous retrouvons dans l'acier. La figure 10 nous décrit ce phénomène et ne demande aucun commentaire.

La figure 11 est le diagramme simplifié de solidification fer-cémentite. C'est une vue d'ensemble sur l'acier tandis que la figure 12 nous concerne plus particulièrement.

En effet nos aciers comprennent entre 0,05 % et 0,45 % de carbone. Aussi, un oeil sur ces deux diagrammes, voyons succinctement les transformations d'un acier à 0,30 % de carbone, de l'état liquide à l'ambiante :

1) à une $t^{\circ} > 1510$ l'acier est entièrement liquide. Il n'y a qu'une phase : c'est une solution liquide de carbone dans le fer liquide. Les atomes animés de mouvements désordonnés sont libres de se déplacer. Il n'y a pas d'ordre.

2) entre 1510° et $(1492^{\circ} + \epsilon)$ la phase δ augmente en quantité. La teneur en carbone de cette phase évolue de 0,06 % C à 0,10 % C. La teneur du liquide évolue de 0,30 % C à 0,50 % C.

3) à 1492°, la phase δ disparaît pour laisser la place à la phase γ , également solide. Il y a transition. La phase γ qui se forme contient 0,18 % de C ; le liquide reste à une teneur de 0,50 % C mais diminue en quantité. On a la relation :



la règle des segments inverses indique :

- à (1492° + ϵ) :

$$\frac{\text{masse } \delta}{\text{masse totale}} = \frac{0,50-0,30}{0,50-0,10} = \frac{20}{40} = 0,5$$

Il y a donc 50 % de δ et 50 % de liquide.

- à (1492° - ϵ) :

$$\frac{\text{masse } \gamma}{\text{masse totale}} = \frac{0,50-0,30}{0,50-0,18} = \frac{0,20}{0,32} = 0,625$$

Il y a donc 62,5 % de γ et 37,5 % de liquide.

Il se dépose donc à 1492°, 12,5 % de liquide qui, ajoutés à 50 % de δ forment 62,5 % de γ et 0,18 % de carbone.

4) entre (1492° - ϵ) et environ 1470°, l'alliage s'enrichit en phase γ qui évolue de 0,18 % de C à 0,30 %. La quantité de liquide diminue pour laisser la place à l'austénite.

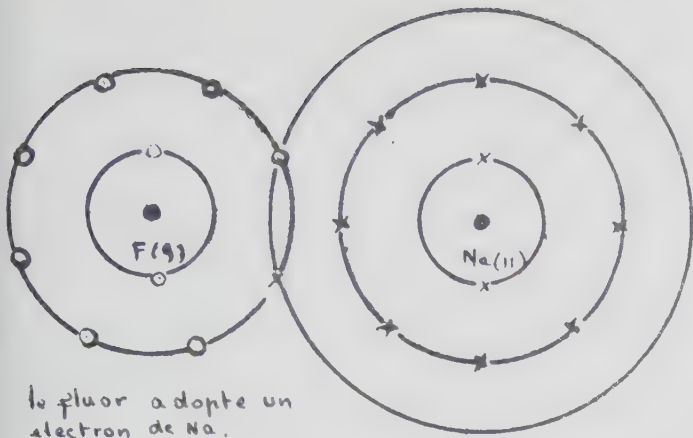
5) à (1470° - ϵ) la dernière trace de liquide est déposée. L'alliage est une solution solide complète de γ à 0,30 % de C.

6) entre (1470° - ϵ) et (825 + ϵ) la phase γ ne varie pas. On peut noter que la solubilité maximale du carbone dans la phase γ varie avec la température. Cette solubilité évolue de 0,18 % C à 1492° jusqu'à maximum de 2 % à la t° entectique : 1130°, puis s'abaisse ensuite à 0,80 % pour la t° de l'Eutectoïde de 723°.

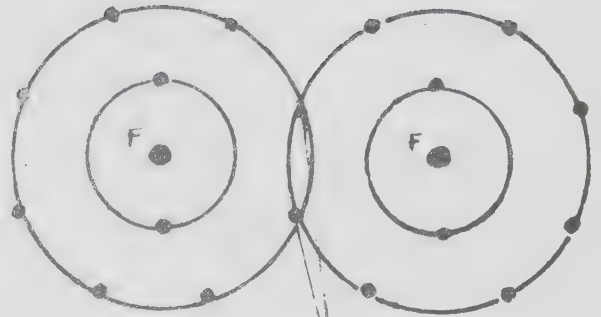
7) à 825° il y a début d'une nouvelle transformation, c'est l'apparition in situ de la phase α , la ferrite : solution solide de C dans le fer α - Cette phase α contient très peu de carbone ($\neq$ 0,007 %).

fig 1

- fig 2 -



le fluor adopte un
electron de Na.

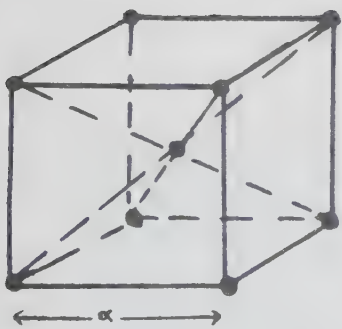


electrons mis en
commun

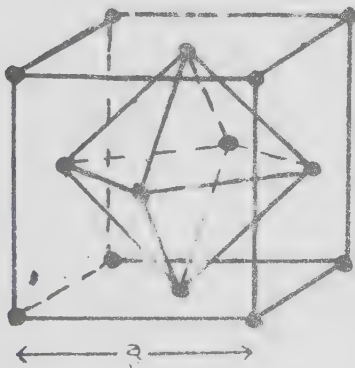
- fig 3 -

- fig 4 -

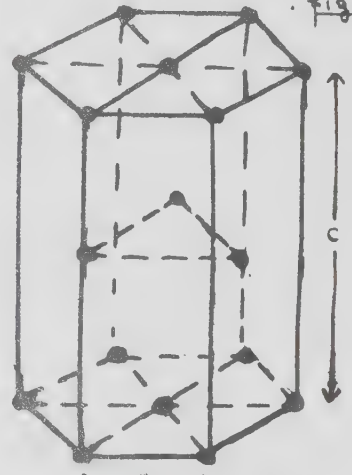
- fig 5 -



Cube centré



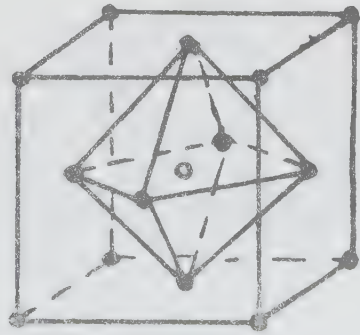
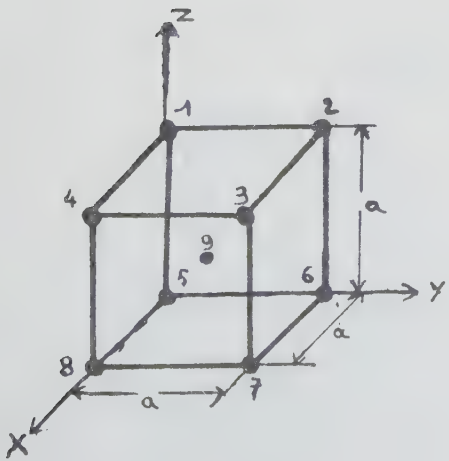
Cube à faces centrées

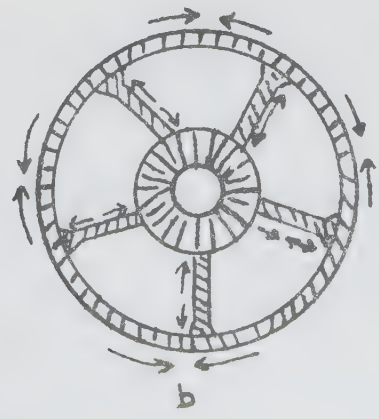
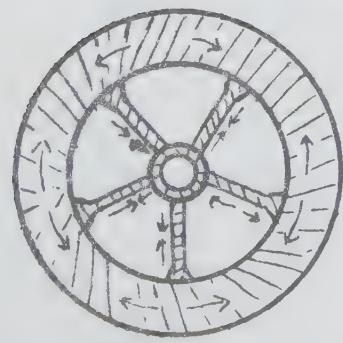
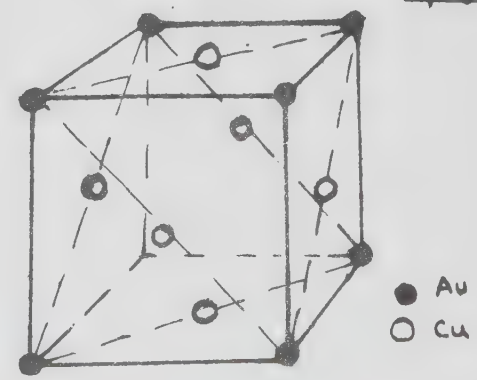
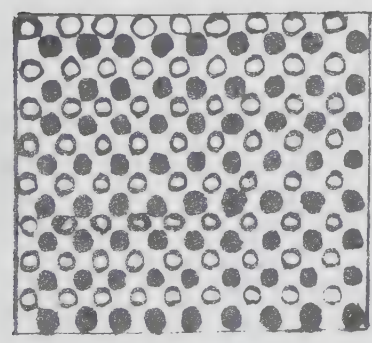
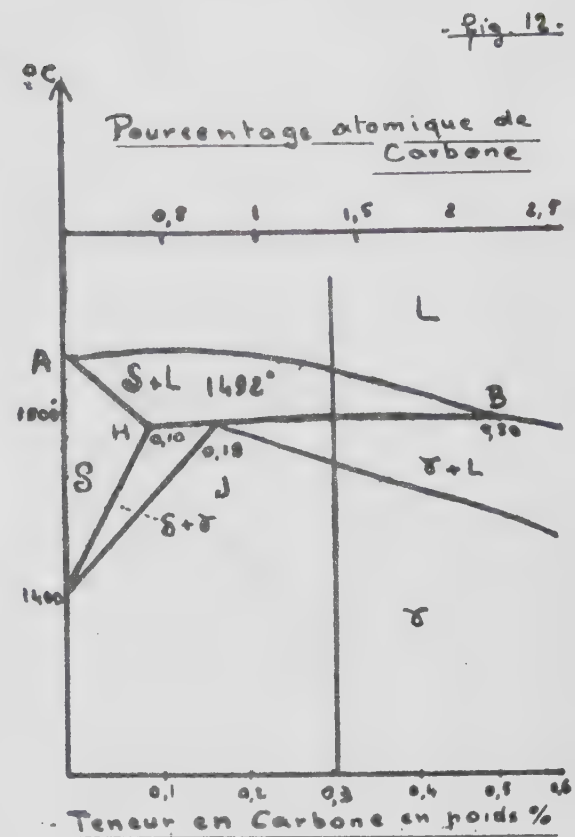
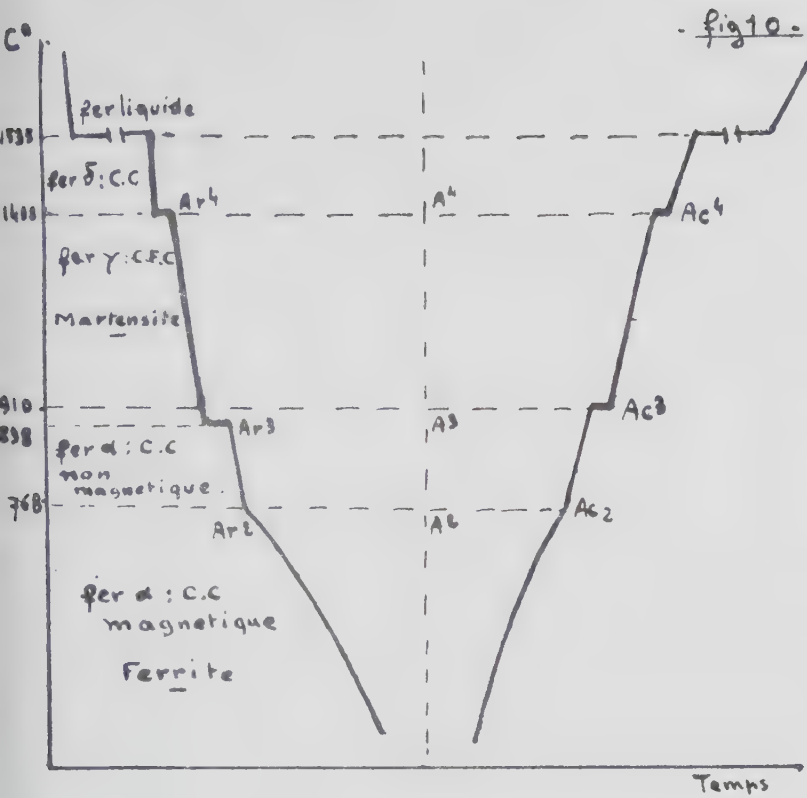


Hexagonal.

- fig 6 -

- fig 7 -





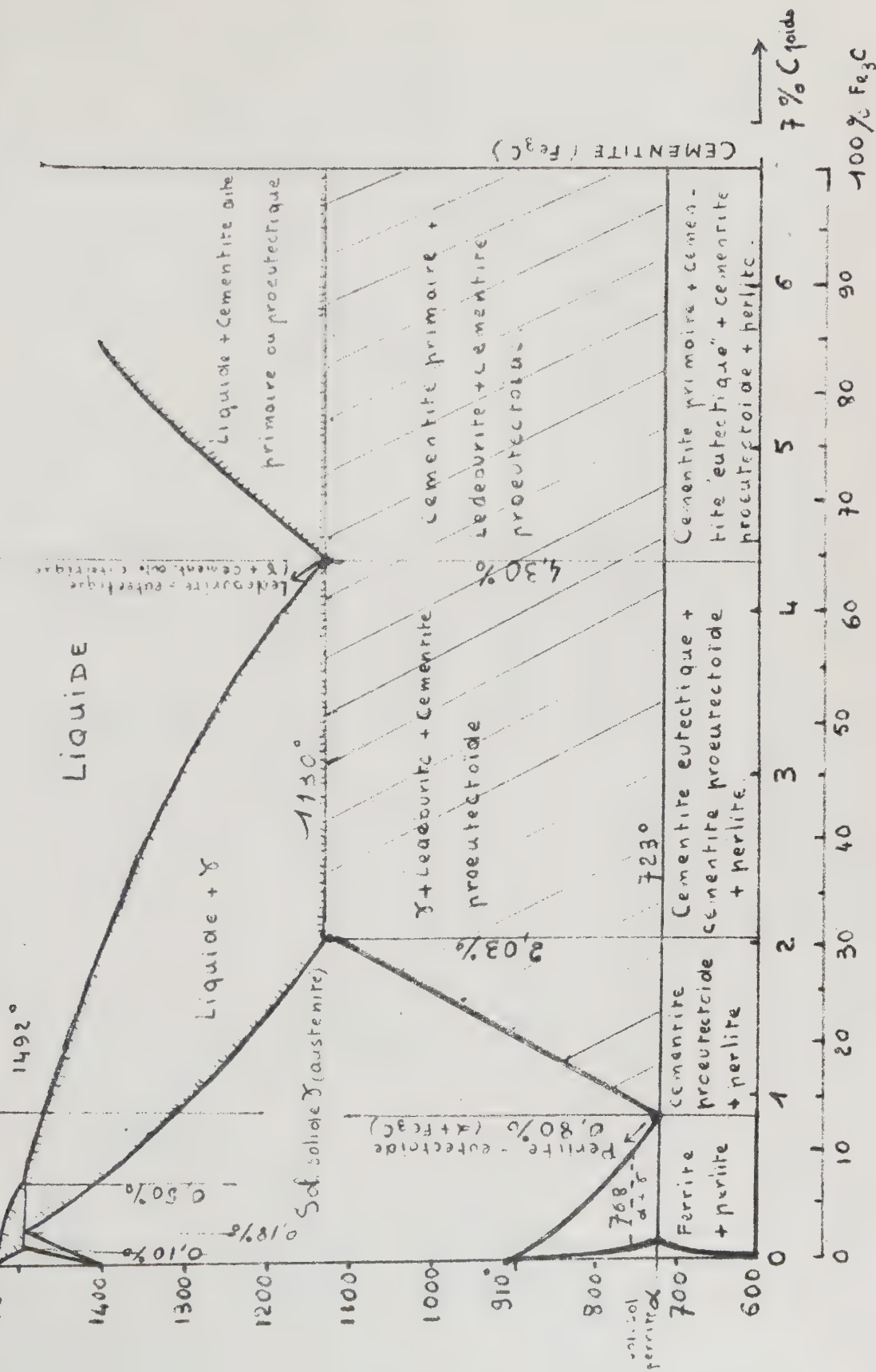
a

b

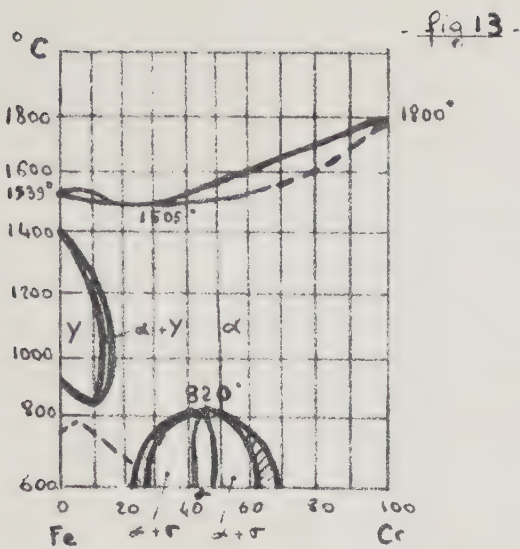
ACIERS

Hypoeutectoides H_p peritectiques alliages hypoeutectiques alliages hypereutectiques

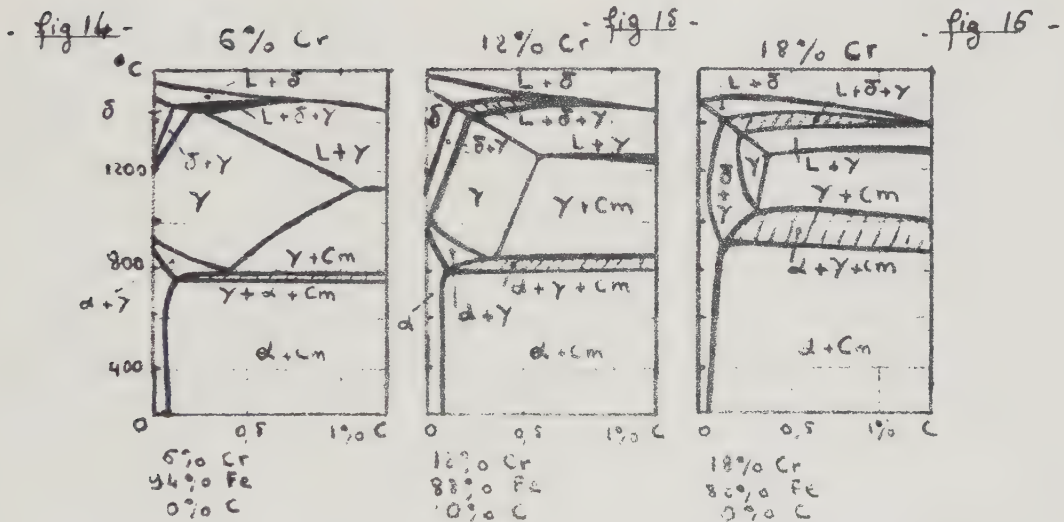
- fig 11 -



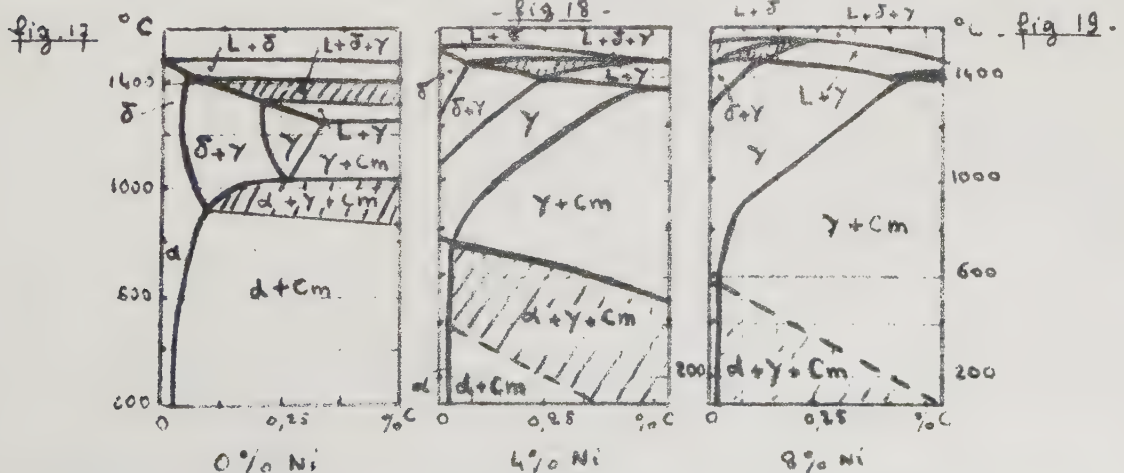
- DIAGRAMME FER-CEMENTITE (Fe-Fe₃C)



- Diagramme d'équilibre Fe-Cr -

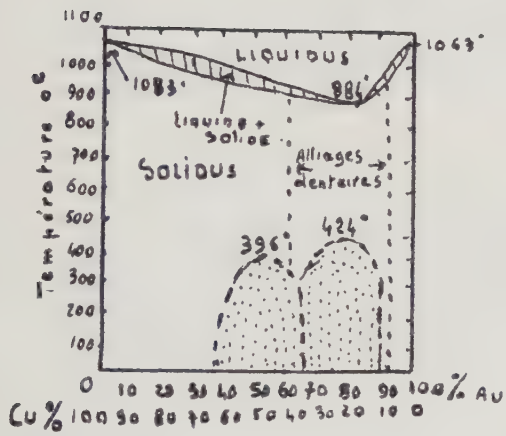


- Coupes pseudo-binaires du diagramme d'équilibre ternaire Fe-CR-C

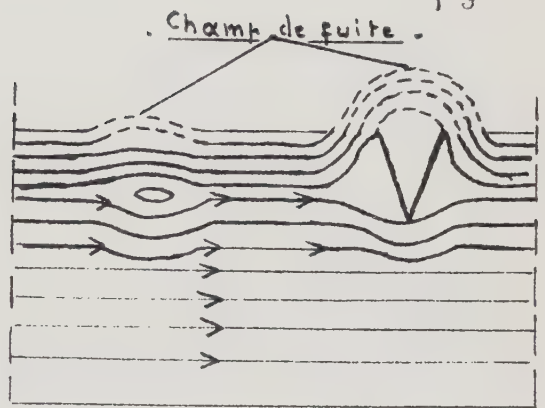


- Influence du Nickel sur la structure des aciers à 18% de Chrome -

- fig 20 -



- fig 23 -



8) de 825° à 723° la phase α augmente en proportion et en teneur en carbone, et, simultanément, la teneur en carbone de la phase γ évolue de 0,30 % à 0,80 %.

9) à $(723^{\circ} + \epsilon)$ sont en présence : α 0,025 % C et γ 0,80 % C.

à $(723^{\circ} - \epsilon)$ γ est disparu, laissant la place au constituant ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) appelé perlite qui est formé de lamelles alternées de ferrite α 0,025 % C et de Fe_3C .

Le carbure de fer Fe_3C contient toujours 6,67 % C.

10) de 723° à l'ambiante, les proportions des différents constituants restent pratiquement inchangées. On peut cependant relever que la ferrite α évolue de α 0,025 % C à α 0,006 % C.

Fragilité

On conçoit facilement qu'un acier "figé" à telle température contiendra des parties plus dures et cassantes (microscopiquement) et que ces parties, non seulement seront causes de fragilité en soi, mais encore impliqueront des tensions internes.

Les diagrammes montrent aussi l'importance de traitements thermiques menés avec précision. Un recuit refroidit lentement donnera un acier malléable, mais si ce recuit est refroidi trop vite après avoir été mené au-delà de la température de recalescence, une grande partie de l'ausiénite sera transformée en martinsite avec changement de réseau cristallin qui devient quadratique $\Rightarrow$ dureté (Brinell 5 à 700) mais fragilité.

Un bon revenu peut corriger en partie cette erreur. (Bien entendu l'effet de trempe, nuisible à notre art, est parfois recherché).

Cette texture plus ou moins dure se détecte par essai de dureté ou de flexion ; elle peut aussi se "voir" au microscope électronique ou, mieux encore, au microscope à émission d'ions. Il s'agit là, hélas, d'essais destructifs et nous ne pouvons pas dans la pratique casser une prothèse pour savoir si elle est bonne.

Microporosité interdendritique

Nous serons beaucoup plus occupés par les défauts liés à la coulée ou à la fatigue. Sachons tout de même que le meilleur alliage contiendra, avant même qu'on le coule ou qu'on le façonne, une multitude de petits défauts inévitables à sa structure et fort heureusement sans gravité le temps d'une vie humaine: la microporosité.

Le cristal, parti d'un germe, endogène ou exogène, se développe perpendiculairement aux plans de faible énergie. Ces axes de croissance étant bientôt stopés par la chaleur des cristaux voisins, les axes secondaires croissent à leur tour comme les branches sur un tronc d'arbre. Ces branches stopées à leur tour forment des rameaux, puis des brindilles, etc ... Le tout forme des "dendrites" (de dendron : arbre). On conçoit que cette structure est aérée malgré le remplissage intense des espaces par les "brindilles" au fur et à mesure de la croissance du cristal.

Mais ce remplissage est incomplet car une fraction de la masse encore liquide peut être entièrement entourée de rameaux jusqu'à être isolée du métal liquide résiduel. Puisque la solidification s'accompagne de retrait (2 à 4 % pour la plupart des métaux simples) et que ce dernier ne peut être compensé par l'apport de métal liquide, il se produit une petite cavité que nous appelons "retassure de cristallisation", invisible à l'œil nu, c'est une microporosité interdendritique.

Aciers inoxydables

L'acier, puisqu'il contient du fer, s'oxyde à l'atmosphère pour donner de la rouille. Cet oxyde de fer, contrairement à l'oxyde de zinc ou d'aluminium ne protège pas le métal sous-jacent. Le fer est franchement anodique par rapport à l'électrode hydrogène tandis que le cuivre et les métaux nobles sont cathodiques.

Les aciers sont rendus inoxydables par adjonction de chrome. Ce métal est merveilleux par sa propriété d'être anodique et de se passiver immédiatement en milieu oxydant jusqu'à atteindre le potentiel cathodique de 0,8 à 0,9 (environ celui du platine). Il fait plus encore et passive les métaux qui lui sont alliés, à la condition toutefois d'avoir une teneur d'au moins 12 %. Son potentiel vire brusquement, sans transition.

a) Aciers inoxydables ferritiques ou martensitiques

Nous allons voir à l'aide de 4 diagrammes combien les traitements thermiques devront être menés avec précision et combien le dosage des éléments devra être précis. Pour simplifier, nous avons transformé les diagrammes ternaires en diagrammes pseudo-binaires (fig.13-14-15-16).

On sait que la présence de carbone est très défavorable. En effet, le chrome, élément carborigène, est extrait de la solution solide Fe-er par le carbone, auquel il se combine. Il est donc indispensable de n'introduire le chrome que dans un acier faiblement carboné. La figure 13 montre combien le chrome rétrécit le domaine γ . La boucle γ s'étend jusqu'à 13 % de chrome et le domaine γ est séparé du domaine α par un étroit domaine à 2 phases ($\gamma + \alpha$).

Les défauts sont faciles à obtenir, soit par trempe à mauvaise température $\Rightarrow$ manque de chrome $\Rightarrow$ alliage oxydable, soit trempe en phase σ qui donne une extrême fragilité.

Les 3 diagrammes suivants (14-15-16) correspondent à 6, 12, 18 % de chrome et montrent l'opposition entre l'élément alpagène chrome et l'élément gammagène carbone.

Suivant les teneurs en chrome, ces alliages peuvent être ou pas transformés en martensite par trempe. Cela explique combien grande est l'erreur de vouloir à tous prix tremper un acier parce qu'il est inoxydable. Le risque est alors d'engendrer des contraintes, causes de fissures et craquelures qui fort heureusement débouchent dans ce cas à la surface et que nous pouvons détecter par des moyens simples.

Les aciers au chrome ferritiques ne peuvent être austénisés et sont donc soudables.

Les aciers au chrome martensitiques sont plus ou moins trempants et ne sont donc pas soudables ; ce sont les aciers de nos instruments chirurgicaux ; ils sont durs, résistants à l'usure, coupants ... et fragiles.

b) Aciers inoxydables austenitiques

La première fabrication date de la première guerre mondiale. Les compositions en ont été diverses et nombreuses jus-

qu'à ce que l'on s'arrête à la composition : cr = 18 % et Ni 8 % qui semble la meilleure à beaucoup d'égards, c'est le fameux acier 18/8.

On y ajoute parfois des traces de Mo, Ti, Nb, Cu, Si, Mn, etc Encore 3 petits diagrammes pseudo-binaires pour comprendre d'un coup d'oeil l'influence du nickel en fonction de la teneur en carbone (fig.17-18-19).

Le nickel, fortement gammogène, change l'acier au chrome ferritique en un acier chrome-nickel austénitique.

Au microscope les aciers 18/8 se reconnaissent à la présence de nombreux macles et à la forme polyédrique des grains dont les joints apparaissent plus ou moins suivant la teneur en carbone. Justement, la précipitation de carbures aux joints de grains peut apporter la catastrophe. Elle se produit entre 550° et 750°. Toutefois, si l'acier a été écroui, les carbures peuvent précipiter dans les plans (111) qui sont des plans de glissement du réseau cubique à faces centrées de l'austénite.

La précipitation de carbures aux joints entraîne des hétérogénéités importantes. Attention au recuit avec trempe à 650° ! Les grains se trouvent alors riches en chrome et les joints pauvres (moins de 10 % sans doute) c'est-à-dire oxydables.

C'est la porte ouverte à la corrosion locale de surface, aux piqûres, puis, si l'aération différentielle empêche la passivation, c'est la corrosion inter-cristalline qui peut arriver, au point qu'une plaque d'acier au chrome ayant seulement perdu avec le temps 2 % de son poids, ayant gardé un brillant relatif, s'effrite entre les doigts. Le défaut ne sera pas visible sur la plaque neuve (sauf à la détruire pour examen au M.E.) mais le sera bientôt par une méthode rapide et simple : le ressuage qui fera l'objet de la dernière partie de notre étude.

D'où l'intérêt de contrôler de temps en temps les prothèses ... avant l'accident. On a à juste titre appelé l'acier 18/8 "le colosse aux pieds d'argile". On dispose heureusement de moyens défensifs contre ce déchromage sélectif des joints de grains : la trempe à 1100°, l'addition d'éléments très carburi-gènes (Ti, Nb), le choix d'une teneur en carbone très faible (ce qui revient au même mais coûte plus cher).

2) Les ors

L'or ne s'emploie pas pur car ses qualités mécaniques sont médiocres pour nous. Il est allié au platine, au Palladium, au Nickel, au Zinc, au cuivre. Les recettes sont nombreuses et nous pouvons donc parler des ors. La découverte des ors modifiables nous a fait, de par leurs immenses qualités, abandonner presque entièrement les autres.

Disons de suite que, sauf erreur grossière, il n'y a pas de défaut de structure au niveau du cristal. Les ors obtenus, suivant la technique employée, seront très différents, mais chacun sera quasiment parfait pour un usage déterminé. Seul un usage ne correspondant pas à la destination d'un alliage précis serait grave.

Les défauts viendront de la coulée et non de la structure, aussi l'étude en sera-t-elle brève.

Faisons tout de suite un sort à l'expression "or auto trempant" qu'on lit encore, même dans la prose des fabricants. C'est une malheureuse confusion entre la transformation de l'acier par les propriétés allotropiques du fer qui, pour être α , γ ou δ reste toujours du fer, et la transformation d'un alliage d'or qui passe de solution solide sans formule à un composé intermétallique, de formule bien précise, Au-Cu ou Au-Cu₃. La trempe de ces ors peut aussi bien fixer l'alliage à l'état dur qu'à l'état mou et s'il est vrai qu'en laissant refroidir lentement l'alliage on obtient un produit dur, il ne peut s'agir d'une auto-trempe.

L'or modifiable est un alliage d'or contenant entre 12 et 60 % de cuivre. Comme la tenue en bouche exige un minimum de 18 carats, on vise habituellement entre 14 et 20 % de cuivre.

Le diagramme binaire (fig.20) nous montre qu'à cette concentration l'alliage se solidifie en solution solide au-dessous de 884° puis, à l'état solide et en refroidissant, se transforme à 424° en un composé intermétallique Au-Cu. Ductile et relativement mou il devient brusquement dur et relativement cassant. Cette propriété peut être aussi bien obtenue à partir de l'alliage froid en le chauffant à plus de 424° et en le laissant refroidir lentement.

Toutes les erreurs peuvent donc être rattrapées et le

traitement indéfiniment recommencé, après une soudure par exemple, à condition de banir toute flamme oxydante.

3) Les stellites

Du latin "Stella", étoile, à cause de leur brillant remarquable. Il n'y a aucun problème de structure, le chrome et le cobalt étant miscibles en toutes proportions à l'état solide et à l'état liquide. Depuis 1946 les stellites sont très utilisés dans l'industrie sous le nom de HS 21.

Par contre la fonte et la coulée peuvent être causes de défauts. On peut conclure de tout ce qui précède dans de chapitre que les défauts venant de la structure du métal, soit par un mauvais choix des composants, soit par des traitements thermiques malmenés, seront des fissures provoquées par des tensions internes. Ces fissures se produiront spontanément ou apparaîtront par fatigue lors du travail de la pièce. Les autres défauts proviennent de la façon ou de l'usage.

B) Défauts nés à partir de la façon

Ce problème nous est généralement plus familier et nos expériences de coulée nous ont confirmé tout ce que l'on trouve chez les bons auteurs.

Nous avons coulé divers alliages avec les précautions d'usage, puis en commettant toutes les fautes possibles et nous avons toujours atteint les résultats escomptés, en bien ou en mal. La présence d'un excellent technicien réduisait à néant nos possibles erreurs dues à l'ignorance ou au manque d'habileté.

Si l'on rencontre encore des défauts de façon dans la pratique, cela tient essentiellement au fait qu'on ne lit pas assez les instructions des fabricants ou bien qu'on pense que les chiffres donnés sont entourés d'une certaine marge. Il n'en est rien et nous pouvons affirmer que pour certains alliages précieux la température de fonte par exemple ne peut varier de plus de 20 degrés sans nuire. Ne parlons pas des laboratoires qui, poussés par la demande, façonnent des prothèses modernes pour lesquelles ils ne sont pas équipés.

Rappelons donc brièvement, sans aucune idée originale, les défauts que nous pouvons rencontrer aux différents stades de la confection d'une prothèse métallique.

1) La mise en revêtement

Des études très poussées sont encore faites pour améliorer les revêtements à haute température. Le principal rôle du revêtement est d'être compensateur et de permettre la précision linéaire et volumétrique de la coulée. Nous nous bornerons à parler de la mise en revêtement qui peut être la cause de défauts. Ces défauts sont engendrés par un mauvais choix ou un mauvais emplacement des tiges de coulée.

Les règles à ce sujet sont simples et impératives et, à la lumière de nos expériences nous pouvons confirmer qu'il faut :

- a) toujours fixer la tige à l'endroit le plus volumineux
- b) si la pièce présente des étranglements, fixer autant de tiges qu'il y a de zones volumineuses
- c) dans le cas de coulée verticale (fronde ou pression de vapeur) le canal d'entrée doit être petit afin que le métal qui commence à fondre ne puisse tomber par pesanteur dans la lumière et empêcher le reste du métal de passer. Il faut dans ce cas adjoindre une "nourrice" contre la cire et placer une grosse tige entre cire et nourrice.
- d) Dans le cas de coulée horizontale (Kerr, Degussa, etc..) il faut au contraire une tige de gros diamètre.
- e) Chaque fois que la pièce présente plusieurs tiges il faut adjoindre des canaux d'échappement d'air reliés à une chambre à air.

Si les règles a et b sont mal observées, il se formera des bouchons car l'alliage solidifiera dans les parties les plus étroites avant que le liquide n'ait pénétré partout donnant une coulée poreuse. Les pores se trouveront n'importe où, autant en surface qu'en profondeur (voir photo 1).

Si la règle c est mal observée il peut y avoir manque de coulée, ce qui est un moindre mal (on sait au moins à quoi s'en tenir). Par contre si la nourrice est insuffisante, la

Photo 1

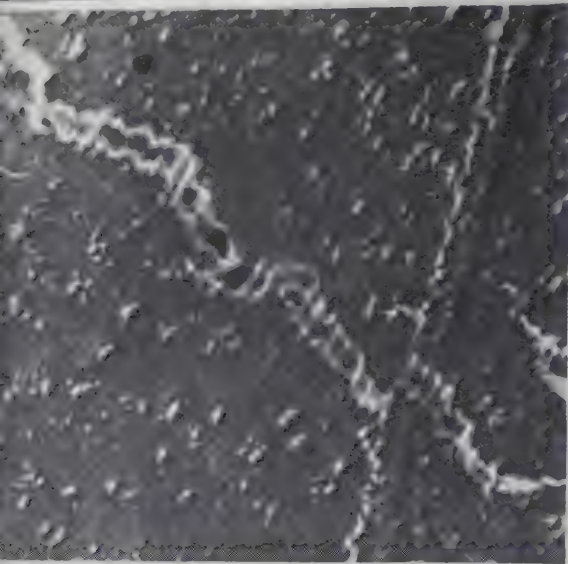
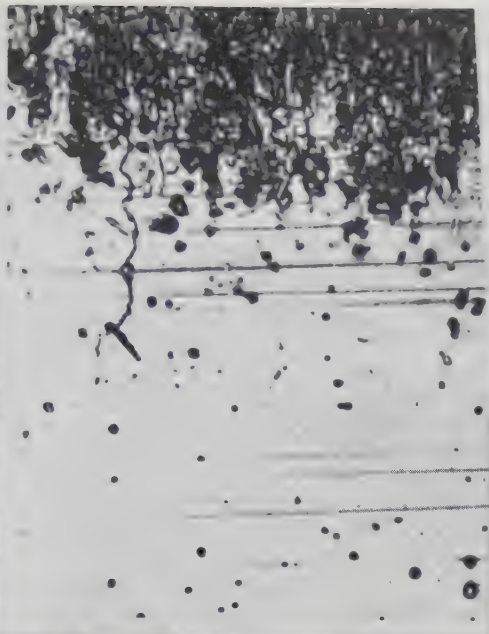
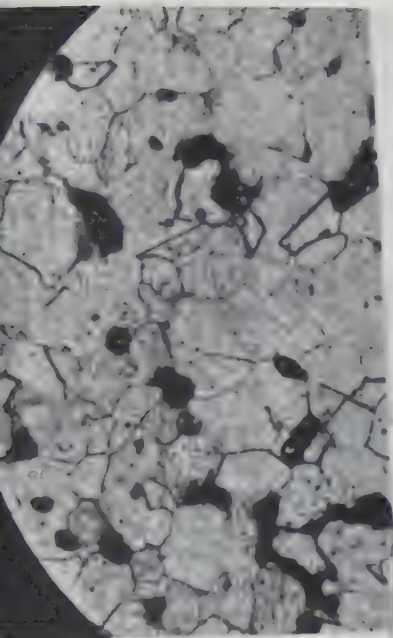
Photo 2

Photo 4

Photo 6

Photo 3

Photo 5



contraction de solidification n'est pas compensée par du métal liquide en surplus. Nous avons alors des porosités.

Si la règle d est mal observée, le métal, entraîné par la seule force centrifuge, durcira avant d'atteindre l'extrémité et nous aurons un manque.

La règle e est peut-être la plus dangereuse car dans une pièce ajourée, compliquée dans l'espace, coulée sous pression de vapeur, le métal remplira coûte que coûte tout l'espace disponible si les tiges de coulée sont assez nombreuses. Mais l'air traqué de partout à une vitesse très grande n'aura ni la place ni le temps de passer à travers le revêtement et formera des bulles minuscules, incluses dans tout l'alliage et à toutes profondeurs.

Aussi longtemps que l'on polisse on tombera toujours sur des porosités qui ne seront pas toujours visibles à l'oeil nu.

2) Chauffe du cylindre

Pas assez chaud : Pour tous types de revêtements le résultat sera le même : d'énormes porosités allant jusqu'au manque visible à l'oeil nu, voire même d'énormes trous ou des pièces à peine venues -(voir photo A). En effet le métal en fusion se refroidit trop vite au contact du revêtement, forme des bouchons comme dans le cas de tiges trop petites ou trop peu nombreuses.

Trop chaud : cet accident est excessivement rare pour les revêtements à liant silicique ou phosphaté. Par contre il n'est pas rare pour les revêtements pour coulée de précision usuelle à base de plâtre. En effet à partir de 700 ou 750° le plâtre subit une décomposition entraînant la production d'anhydride sulfureux selon la formule :



Les alliages d'or deviennent alors très cassants, surtout s'ils contiennent Ag, Cu, Pd.

3) Chauffe de l'alliage

Au chalumeau, le résultat est le même si la flamme est réductrice (jaune). Par contre si la flamme contient trop d'air elle est oxydante et provoque des pores. Ces pores obtenus par dégagement gazeux pourront se présenter en surface sous forme de "bulles" qui deviendront bien entendu des creux au polissage.

4) La coulée

Les défauts viennent généralement en fin de refroidissement.

a) Tapures : ce sont des déchirures internes qui prennent naissance à la surface. Les bords sont sensiblement écartés et les parois sont généralement à profil tourmenté (photo 2). Elles sont causées par les tensions internes consécutives à des déformations plastiques hétérogènes. En effet, plus la pièce est volumineuse, plus grands sont les risques de voir les différentes parties se refroidir en des temps différents. D'autre part chaque constituant de l'alliage présente des coefficients de dilatation différents d'où le risque de tiraillements.

b) Retassures : c'est un phénomène connexe de la cristallisation. La solidification se fera d'abord à l'extérieur de la pièce car le revêtement sera un peu moins chaud que le métal en fusion. La libération de chaleur étant intense à ce niveau, il peut se former une croûte superficielle alors que l'intérieur est encore liquide. La contraction de l'alliage dans la couche interne sera plus importante (en rapport avec sa masse) et des vides se feront non loin de la surface.

c) Contraintes résiduelles : Dans une pièce moulée qui refroidit de manière non uniforme à cause de la différence de masse de ses divers éléments, il subsiste souvent des contraintes résiduelles à l'état brut de coulée.

L'origine de ces tensions peut être illustrée par l'exemple d'une plaque décollétée schématisée en forme de roue de charette (fig. 21 et 22).

Suivant que la masse est surtout à l'intérieur ou à l'extérieur par rapport à chaque tige de coulée.

Considérons d'abord le cas d'un volant à moyeu mince, rayons minces et jante épaisse (fig. 21). Quand le moyeu et les

rayons sont déjà solidifiés, il y a encore du métal liquide dans la jante. Au moment où la jante est complètement solidifiée, moyeu et rayons sont déjà beaucoup plus froids. Mais la résistance mécanique des métaux augmente considérablement avec l'abaissement de la température tandis que leur plasticité diminue.

Quand le moyeu et les rayons sont déjà relativement froids, la jante doit encore se contracter considérablement ; son retrait est toutefois gêné par les rayons et il est évident qu'il apparaîtra des tensions internes dans la jante et des contraintes de compression dans les rayons.

Inversement, dans le 2e cas (fig.22) il apparaîtra des contraintes de compression dans la jante et de tension dans les rayons. On constatera dans le 1er cas des fissures et des criques dans la jante, et dans le 2 cas des fissures entre moyeu et rayons.

Dans la pratique on évitera donc, dans la mesure du possible, de prévoir une prothèse métallique où de grosses différences de masse se cotoient.

d) Le soudage : Pour nous, une mauvaise soudure est toujours une soudure poreuse. Les porosités viennent d'inclusions de gaz, soit qu'un des composants se vaporise par une chaleur excessive dans le cas d'apport de soudure, soit même par l'hydrogène de l'air en cas de soudure électrique.

Par exemple les composants des soudures d'or sont presque toujours un alliage Au-Ag-Cu auquel on ajoute soit Zn, soit Sn ou Cd. Or les points d'ébullition de ces métaux sont fort bas, c'est dire que la marge entre leur fusion et leur ébullition (avec dégagement de gaz) est étroite. Pour mémoire :

Zn :	fusion :	419,5	-	ébullition	:	907
Sn :	"	232	-	"	:	2 270
Cd :	"	321	-	"	:	767

Une soudure contenant du Cd et chauffée à plus de 767° sera poreuse et l'on sait qu'un simple chalumeau à gaz, non oxyhydrique, peut donner 1 100° ... Rappelons de plus que si de la cire collante reste sur le métal et est brûlée, on crée une atmosphère réductrice. Alors le soufre attaque le métal. D'autre part

les oxydes doivent être dissous au borax déshydraté ... mais personne n'ignore plus ces recettes de cuisine.

C) Défauts issus de l'usage

Toute prothèse, en quelque matériau qu'elle soit, mal conçue dans l'espace, mal ajustée ou devenue lâche, peut se fissurer jusqu'à la fracture. Mais là n'est pas le sujet de notre étude et nous avons supposé au départ que la prothèse était parfaitement conçue dans l'espace et le restait. Le seul problème qui nous reste donc, provenant de l'usage, sera donc celui de la corrosion.

La théorie d'Evans est trop connue pour être rappelée et nous n'aurons pas la prétention d'y ajouter une virgule. Elle s'applique uniquement, bien entendu, aux alliages métalliques ou aux parties métalliques des autres prothèses.

La théorie de Nerst qui a fait éviter en son temps bien des erreurs est presque devenue une Lapalissade puisque personne ne s'expose plus à faire voisiner dans une bouche métaux vils et précieux et qu'en tout état de cause le potentiel hydrogène (pH) de la salive est quasi-neutre (le pH est le cologarithme de la concentration en H^+ exprimée en ions/g par litre). Par ailleurs le chrome se passive lui-même dans nos alliages inoxydables et transmet aux autres constituants cette propriété.

La théorie des couples d'aération différentielle d'Evans trouve par contre des applications d'autant plus nombreuses que nos prothèses mobiles sont de plus en plus élaborées, décollées, tourmentées. Nos prothèses fixes et amovo-inamovibles évoluent aussi par leurs attachements vers la multiplication des angles, creux, etc ...

On peut penser que nos alliages nobles qui si sont le plus souvent des composés intermétalliques rejoignent en homogénéité cristalline les combinaisons définies comme la cémentite des aciers. Le seul problème sera donc l'existence de creux ou de trous, aussi minimes soient-ils, depuis la petite logette pour une micro-vis d'attachement, la rainure même de cette vis, jusqu'à la micro-porosité.

Que se passe-t-il alors ? La corrosion locale électrochimique s'arrête par passivation à moins qu'elle ne soit activée par aération différentielle. Dans le premier cas les dégâts causés sont limités ; si le centre de corrosion se déplace constamment on a la corrosion locale généralisée. Si au contraire il ne se produit pas une passivation rapide du centre de corrosion, celle-ci se poursuit jusqu'à formation d'une petite cavité ; c'est la corrosion par piqûres qui peut s'amorcer de la façon suivante : dans un milieu conducteur (la salive) une inclusion noble forme un couple au contact de tout métal moins noble qui joue le rôle d'anode et se dissout. Alors la surface du métal peut être passivée à l'endroit de la corrosion qui s'arrête alors et se limite à une petite cavité qui ne nuit pas à la solidité de la prothèse.

C'est qu'en bouche la moindre cavité est tapissée de salive stagnante, elle est donc moins aérée que la surface environnante, d'où concentration en oxygène plus basse au fond du puits que sur ses bords et couple galvanique par aération différentielle. Si la force électromotrice du couple ainsi formé est insuffisante pour s'opposer à la polarisation et si, de plus, le métal n'est pas attaqué chimiquement, la surface du puits sera passivée. Si au contraire la force électromotrice du couple est suffisante pour amorcer la dissolution anodique du métal au fond du puits, il devient probable, étant donné que la différence d'aération et par conséquent la force électromotrice croissent avec la profondeur du puits, que l'attaque ne s'arrêtera pas avant la perforation complète. La corrosion par piqûre est alors perforante. En surface cette corrosion peut n'être pas visible à l'oeil nu. Elle apparaîtra pourtant à coup sûr au ressuage.

II - Défauts des résines

Nos résines sont des polymères artificiels et donc des colloïdes, au même titre que le caoutchouc, les protéides, les savons, les diastases, le charbon, etc ... Cette moderne conception nous montre que nous entrons dans le domaine de la chimie pure et que les défauts des résines ne seront pas de structure.

En effet, si nous mettons en présence Na et Cl dans les conditions normales, nous obtenons Na Cl et rien d'autre et ce ne sera pas de l'à peu près ni du mauvais Na Cl car sa composition en est immuable, mathématique.

large que le précédent et les porosités se trouvent alors aussi bien en surface qu'à l'intérieur.

4) Manque de pression durant la polymérisation. Les bulles alors ne sont pas sphériques. Elles sont plus petites que celles du type précédent mais plus grandes que celles causées par une prise trop rapide.

Cet inconvénient est évité presque totalement dans la technique de l'injection de résine.

III - Défauts des porcelaines

A) Structure

Comme dans la plupart des matériaux céramiques, les atomes de nos porcelaines sont de liaison primaire. Dans le quartz par exemple, le lien est à la fois ionique et covalent avec une disposition tétraédrique. Il n'y a pas d'électron libre et par conséquent la conductivité de la chaleur et de l'électricité sont médiocres.

Les dispositions atomiques sont plus complexes que dans les métaux, et, à cause de la grande force des liens, les réactions sont peu vigoureuses. Nos porcelaines sont pratiquement inertes.

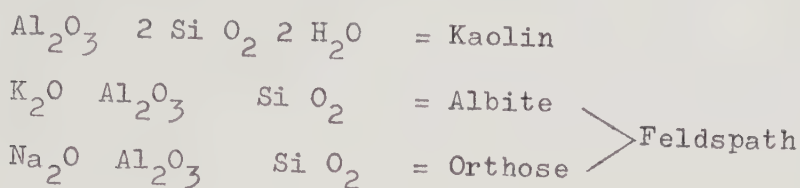
Durant le refroidissement du quartz, la vitesse de diffusion atomique est si lente qu'il solidifie avec une structure liquide au lieu d'une structure cristalline.

D'autres atomes peuvent être introduits dans la structure de la silice, le sodium par exemple peut fournir un électron à un atome d'oxygène dans le tétraèdre ; il en résulte que les liens Si-O deviennent moins importants et que la masse fondue devient moins visqueuse. Si trop de tétraèdres sont rompus, la silice peut cristalliser et former des "dendrites".

Les oxydes agissent d'ailleurs différemment à ce sujet : l'oxyde borique (B_2O_3) contribue à la préservation du réseau de la silice, c'est un "formateur de verre". Les oxydes tels que Na_2O , K_2O et CaO tendent à interrompre le réseau et sont des "modificateurs". Al_2O_3 agit dans l'un ou l'autre sens suivant

sa teneur, c'est un intermédiaire.

Tous ces oxydes sont en fait employés :



B) Conduite mécanique - Les fissures

A cause de sa structure, la silice n'est absolument pas ductile après vitrification. Les dislocations et coulées ne peuvent donc pas se produire, ce qui est excellent pour sa stabilité dimensionnelle mais nuisible à sa résistance en compression, traction et flexion.

Les irrégularités de surface aggravent ce manque de résistance, ce sont des micro-fêlures produites par la concentration des forces de contrainte. Dans les métaux ces forces peuvent être compensées par une déformation plastique ; mais la porcelaine n'est pas ductile et la force excède facilement la résistance de la céramique, dans ce cas la fêlure augmente. C'est au fond de la fêlure que l'action des forces est la plus grande. Or il n'y a pas de plans de glissements comme pour les métaux et la matière cède d'un coup d'une façon quasi-explosive.

La fissure semble se former au refroidissement de la pâte. La couche extérieure ou "peau" se refroidit plus vite que l'intérieur. La contraction thermique entraîne des forces de tension qui sont différentes à l'intérieur et à l'extérieur. On conçoit bien que les forces opposées qui essaient de se neutraliser puissent produire des fissures de surface (voir photo 6, une micro-fissure observée au microscope électronique).

On peut réduire ce risque en rendant la peau plus épaisse. On fait alors un "revenu". La porcelaine est chauffée à une température qui permet un relâchement et refroidit brusquement. La peau devenue plus épaisse s'oppose aux forces de tension. On peut aussi pratiquer un remplissage qui empêche la propagation de la fissure. On forme une structure à coeur.

L'idéal est d'obtenir un même coefficient d'expansion

linéaire pour le coeur et la peau. La suspension de quartz est alors excellent mais le matériau le meilleur est certainement l'alumine recristallisée (Al_2O_3)² dont les particules ont un meilleur module d'élasticité que le quartz et donc plus efficace pour interrompre la propagation de la fissure. De plus l'alumine ne change pas de forme en chauffant, contrairement au quartz qui passe de la forme basse (quartz α) à la forme haute (quartz β) à 573°.

Sauf à employer une alumine de très grande pureté, cet oxyde nuit à la translucidité.

3) Les porosités

Elles sont dues à l'air renfermé pendant la cuisson. Des bulles grosses et peu nombreuses uniront moins à la translucidité que des bulles petites et nombreuses, par contre elles uniront plus aux propriétés mécaniques.

Ces porosités apparaissent rarement à la surface car les gaz retenus en surface s'échappent facilement. Les bulles seront moins nombreuses dans une porcelaine cuite à haute température car la viscosité est suffisamment basse pour permettre à l'air de s'échapper durant la vitrification.

Trois méthodes peuvent être employées pour l'élimination de tels vides :

a) cuisson sous vide - Elle est bien connue : en absence de gaz aucune poche ne peut se former. Le vide est hélas relatif. Toutefois le volume des pores peut être estimé à 0,1 % de la porcelaine au lieu de 4,5 % en cuisson normale. Cette technique a donc fait faire à nos porcelaines de merveilleux progrès.

b) Un gaz diffusible est substitué à l'atmosphère et se trouve dissous dans la porcelaine. On emploie surtout l'hélium et l'hydrogène.

c) Refroidissement sous pression : Les gaz inclus sont alors comprimés et les porosités deviennent si petites qu'elles sont quasi-négligeables. Méthode séduisante mais qui présente un désavantage : la porcelaine ne peut plus être recuite ou glacée sous pression atmosphérique et encore moins sous vide

sans que les bulles reprennent leur dimension d'origine.

Les porosités étant presque toujours internes tandis que les fissures débouchent à la surface, nous aurons plus de facilité à déceler ces dernières pour peu que des tests appropriés soient utilisés.

CHAPITRE III

-:-

DETECTION DES DEFAUTS

-:-

Les techniques de détection des défauts de n'importe quel matériau peuvent se classer en deux groupes : les méthodes destructives et les méthodes non destructives.

Les premières sont utilisées depuis longtemps. Il s'agit essentiellement des études au microscope d'un échantillon, ce qui entraîne l'amputation de la pièce et sa mise au rebut si sa taille est petite, ce qui est toujours le cas pour nous. Cette méthode n'est donc pas applicable à notre art sauf en ce qui concerne la recherche. Cette dernière utilisation nous oblige tout de même à survoler cette technique.

A - Méthodes destructives

I/ Microscope métallographique

Toutes les particularités sont les mêmes que dans le microscope ordinaire, sauf le système d'illumination. En effet, les métaux n'étant pas transparents, l'observation se fera uniquement par réflexion.

Or, éclairer le dessus de l'échantillon pose un problème car, aux forts grossissements, la distance objet-objectif est de l'ordre de 0,1 mm. Il est donc impossible d'amener la lumière dans un couloir aussi étroit et de toutes façons les rayons seraient alors parallèles à la surface de l'échantillon.

On illumine donc à l'aide d'un prisme placé à l'intérieur du microscope et qui reçoit la lumière de l'extérieur par une fenêtre percée dans l'enveloppe. Cette lumière frappant le prisme à 45° est réfléchiée sur l'objet, repart en sens inverse, traverse le prisme (angle différent de 45°) et frappe l'oeil de l'observateur (principe de Chatelier).

Il va sans dire que l'échantillon doit être parfaitement poli, d'abord pour réfléchir la lumière, et surtout pour présenter les saillies les plus faibles possibles car la profondeur de champ est d'autant plus réduite que le grossissement est grand.

La méthode de polissage est bien connue. Pourtant il faut une grande habitude pour obtenir un premier poli-main correct. Le polissage électrolytique est ensuite pratiqué systématiquement, il est obtenu par effet de pointe. Il est plus facile, plus rapide et plus précis pour nos essais de le pratiquer au pinceau plutôt qu'au bain. Ensuite on attaque ou non suivant qu'on fait ou non une étude des joints de cristaux ou des constituants.

Pour l'étude des solutions de continuité à une échelle moins fine que celle des joints, un simple polissage suffit. Pour notre part un examen après un polissage manuel est suffisant pour détecter toute solution de continuité. Mieux encore, un simple décapage chimique est préférable car le polissage risque d'emplir une fissure de pâte ou de fils de feutre.

II/ Microscope électronique

Disons simplement que le principe de grossissement est le même mais que les rayons cathodiques remplacent les rayons lumineux et que des lentilles électromagnétiques (non matérielles) remplacent les lentilles traditionnelles. Un vide poussé est maintenu à l'intérieur pour augmenter la vitesse et donc la force des particules et l'observation se fait sur un écrou fluorescent.

L'augmentation du grossissement n'est pas tellement recherché mais plutôt l'augmentation du pouvoir séparateur et de la profondeur de champs.

Le pouvoir séparateur, donné par la formule $\delta = \frac{\lambda}{n \cdot \sin}$

atteint une valeur très grande puisque la longueur d'onde des rayons cathodiques est 10 000 fois plus petite que celle de la lumière. On peut donc diminuer l'ouverture autant qu'on le désire et obtenir ainsi une grande profondeur de champ, ce qui permet d'étudier à fort grossissement des surfaces rugueuses ou attaquées en profondeur.

Bien entendu le microscope électronique présente quand même une infirmité : malgré un vide poussé (10^{-4} mm de Hg) les électrons ne pénètrent le métal que sur 500 Å environ . On ne peut presque jamais obtenir une feuille aussi mince.

Or par réflexion ou par émission le pouvoir séparateur est limité à 500 Å dans les meilleures conditions. Il nous faut donc pour travailler à transmission et avoir ainsi un pouvoir séparateur de 5 à 8 Å faire une réplique très mince de l'échantillon. Les résultats sont d'ailleurs excellents pour peu qu'on s'en donne la peine (photo 4 montrant une fissure en positif sur une réplique).

Cette réplique sera obtenue par application de carbone, fibre de plastique, formvar, etc ... La technique de l'ombrage, souvent pratiquée depuis cinq ou six ans permet d'obtenir de beaux effets de relief.

On commence maintenant à se passer de réplique dans certains cas en obtenant des plaques métalliques extrêmement minces, soit par polissage électrolytique poussé jusqu'à perforation ; on examine alors le bord des trous, soit par bombardement ionique qui implique un appareillage complexe et que nous avouons n'avoir pas fréquenté (de nouvelles lames de rasoir sont afûtées ainsi).

III/ Microscope Ionique

Ses performances sont extraordinaires puisqu'on arrive pratiquement à la vision de l'atome. C'est la grande nouveauté et, à notre connaissance il n'en existe pas en France. Nous souhaitons vivement être démentis.

B - Méthodes non destructives

La plupart ne sont d'aucune utilité pratique pour notre art dans l'état actuel de la technique. Mais justement parce qu'elles peuvent un jour le devenir il est bon d'en dire quelques mots, ne serait-ce que pour préciser en quoi elles ne peuvent encore nous concerner.

I - Les ultra-sons

La théorie des mouvements vibratoires explique que lorsque les dimensions d'une source sonore sont petites par rapport à la longueur d'onde du son émis cette source rayonne dans toutes les directions.

Au contraire, dans le cas des ultra-sons, les dimensions de la source sont assez grandes par rapport aux longueurs d'ondes pour qu'il y ait concentration d'énergie acoustique selon un axe privilégié.

Lorsqu'une vibration acoustique ébranle un métal, si elle rencontre un défaut qui fait poche de gaz, ce défaut joue comme un écran ; une partie de l'énergie vibratoire est transmise ; l'autre partie subit des effets de réflexion.

Pour le contrôle non destructif des matériaux on travaille en haute fréquence : 40 KHz à 15 MHz. Ces ondes ultra-sonores sont produites par effet piézo-électrique.

Hélas la partie électronique de base, celle qui "touche" le matériau est le "sondeur" et cette pièce doit s'appliquer très exactement à la forme à étudier, elle doit être construite dans ce but et c'est là que le bât blesse pour notre usage.

Dès lors, les produits à sonder doivent être bien définis et égaux par leur forme et leurs dimensions limites.

Ces paramètres étant respectés on obtient des indications très précises sur tous les défauts d'une pièce, leur forme et leur emplacement mais non pas leur nature. Un stylet court sur une bande-rouleau et marque une "pointe" au passage du défaut, l'amplitude de la pointe en indique la profondeur.

La sensibilité de cette méthode va jusqu'à signaler par exemple une géode grosse comme une tête d'épingle dans un rail de chemin de fer.

Le problème est justement que nos prothèses ayant des formes variant à l'infini il est exclus de fabriquer un palpeur à chaque usage. Ce palpeur serait livré au bout de quelques mois et coûterait mille fois le prix de la prothèse !

Soyons sérieux et laissons pour le moment aux rails et aux tôles l'avantage de cette méthode.

II - Effets magnétiques, électro-magnétiques et électro-dynamiques

Ces méthodes ne sont pas non plus utilisables pour l'instant par nous. Mais pour l'une d'entre elles l'espoir nous est permis dans un avenir proche.

Il nous faut donc suivre cela de près et, pourquoi pas, poser dès maintenant nos problèmes pour orienter la recherche.

Il est bien certain que l'industriel ne s'intéresse qu'au contrôle de millions de pièces du même type et qu'un grand pas reste à faire vers la **personnalisation**.

A/ Contrôle magnétique

Il utilise les phénomènes créés par la mise en présence d'un matériau ferro-magnétique et d'un champ magnétique. C'est dire déjà qu'il exclut de toutes façons les alliages qui ne contiennent pas de fer.

On utilise le phénomène de champ de fuite d'un champ longitudinal ou d'un champ transversal d'une pièce traversée par un courant qui peut être de différents types.

1) Champ de fuite :

Si nous rencontrons un obstacle, notre première réaction est de le contourner plutôt que de passer au travers. C'est ce que font les champs magnétiques dont les lignes de force vont toujours choisir le chemin le plus aisé, le moins relucant. Cette perturbation se communiquera aux lignes de force adjacentes et se propagera jusqu'aux lignes proches de la surface de la pièce. Ces dernières, ne trouvant plus de place vont "fuir" vers l'extérieur, au droit du défaut (fig.23).

En projetant à la surface de la pièce de fines particules d'oxyde magnétique, celles-ci seront attirées et s'accumuleront au droit des défauts.

La couleur de ces oxydes est noire ou rouge mais il est maintenant habituel de les pigmenter en fluorescence, de les projeter sur la pièce au sein d'un jet de kérosène ou d'un mouillant et de regarder la pièce sous lumière noire.

Ce contrôle est certainement l'un des plus séduisants que nous ayons pratiqué : il s'agissait d'un appareil "contromag" installé à la RNUR du Mans, contrôlant un élément de direction de voiture et donc réclamant un coefficient de sécurité maximum ; c'est une pièce de fonderie en acier noble.

Les défauts apparaissent comme des cheveux fluorescents, généralement de 0,5 à 2 cm de long. Le spectacle est fascinant et le seul respect des convenances peut faire quitter la salle.

Ajoutons que, comme pour tous les contrôles de matériaux, le facteur humain est très important. Le technicien doit juger seul les défauts acceptables et ceux qui demandent le rebut, suivant l'ampleur du défaut mais aussi son emplacement.

Cette petite merveille mesure de 15 à 20 m de long, sans compter le tunnel de démagnétisation ...

2) Champ longitudinal ou transversal

ou bien la pièce est traversée comme une barre de métal reliant les 2 pôles d'un aimant : c'est le champ longitudinal, ou bien la pièce est un conducteur et crée par conséquent un champ perpendiculaire au courant.

Si ce conducteur est lui-même magnétique il canalise les lignes de force de ce champ qui est alors transversal.

3) Type de courant

a) alternatif : c'est le plus facile à obtenir sous forte intensité. Mais l'effet pelliculaire de ce courant ne permet que la détection de surface. De plus on sait que l'intensité admise est inversement proportionnelle à l'impédance qui elle-même est fonction de la self. Or la self est un élément particulier au courant alternatif. Nous pensons que c'est la raison pour laquelle on s'est orienté de plus en plus vers le courant continu.

b) continu : obtenu en redressant l'alternatif (les accumulateurs étant trop encombrants). Il n'y a plus d'effet pelliculaire et la détection est huit fois plus profonde qu'avec le courant alternatif. Par contre les particules sont moins attirées d'où détection plus difficile des défauts très fins.

c) pulsé : sans doute est-ce l'avenir car le courant pulsé est un compromis qui bénéficie surtout des qualités des 2 types précédents. C'est un courant alternatif monophasé, une valve éliminant toutes les demi-alternances négatives. La self existe encore très faiblement, l'effet pelliculaire est presque nul. La détection doit atteindre en profondeur environ 7 fois celle du courant alternatif et atteindre presque sa finesse.

B/ Contrôle par induction électromagnétique

Trois procédés sont utilisés :

1) Procédé de flux de fuites magnétiques, qui s'apparente à la magnétoscopie mais où la distorsion d'un champ magnétique provoquée par une crique est détectée par une bobine ou par une sonde magnétique très peu utilisée.

2) Par perméabilité magnétique des ferromagnétiques, soit à l'aide du cycle d'hystérésis, soit par la perméabilité différentielle. Assez employée en industrie quoique demandant une interprétation délicate.

3) Par les courants de Foucault : Voici l'espoir pour la raison que cette méthode permet de contrôler tous les métaux et même plus facilement ceux qui ne sont pas ferreux. Espoir aussi parce que les sondes semblent pouvoir être miniaturisées et accepter de ne pas suivre exactement le tracé du matériau à contrôler.

Le principe en est simple : lorsque l'échantillon métallique est approché d'une bobine, l'impédance de la bobine est modifiée par les courants induits dans l'échantillon. La base de la méthode est la mesure de ce changement d'impédance. La technique, quoique très intéressante et en perpétuelle évolution (surtout depuis les travaux de l'Institut Forster en Allemagne en 1969) ne peut être abordée dans le cadre de cette étude.

Disons seulement que la sonde est composée de deux bobi-

nes montées de deux façons différentes : ou bien en montage absolu, la mesure des variations d'impédance se faisant par rapport à une bobine vide, ou bien en montage différentiel, les deux bobines étant montées en opposition et l'on compare leurs variations relatives. Dans ce dernier cas, ou bien les bobines sont séparées, l'une contenant un échantillon de référence et l'autre l'échantillon à contrôler, ou bien les deux bobines sont accolées sur l'échantillon et l'on compare les variations d'impédance des deux sections d'échantillon.

Ce dernier montage nous intéresse car il est peu sensible aux variations de diamètre ou de caractéristique structurale de l'échantillon ; il est aussi plus sensible aux défauts courts (craques, fissures).

III - Vernis photos-élastiques

Ce test est employé pour les métaux polis afin d'en déterminer les zones plus ou moins élastiques. Nous n'avons pas eu la possibilité de faire des tests assez nombreux pour en tirer des conclusions valables. Il semble toutefois que sur prothèses amovibles métalliques les résultats soient encourageants surtout dans les zones les plus exemptes de relief. La méthode est en effet extrêmement précise dans la mesure où le métal peut jouer le rôle de miroir-plan.

On recouvre la pièce à étudier d'une couche d'un vernis spécial de grandes propriétés photo-élastiques, étalé au pinceau, par trempage ou au pistolet. Vu le peu de surface à recouvrir il semble que pour nous le pinceau soit le meilleur. L'épaisseur la plus satisfaisante nous semble être 1 mm de vernis.

On opère par réflexion. Un faisceau de lumière polarisée envoyé sur la pièce traverse le vernis, se réfléchit sur la face postérieure, retraverse le vernis et est observé au travers d'un polaroïd analyseur. Le vernis, parfaitement adhérent, suit exactement les déformations engendrées par un vibreur quelconque. La birefringence accidentelle qu'acquiert le vernis au cours de l'essai reproduit l'état de déformation réel de la pièce.

On observe des lignes et des franges colorées qui révèlent les contraintes du métal. Le procédé permet donc de localiser les zones qui risquent de faillir à l'usage. Bien entendu, les vibrations créées artificiellement ne correspondent pas à l'usage de mastication, et seules des expériences multiples, classées

et étalées dans le temps permettraient d'extrapoler les résultats immédiats.

IV - Vernis craquelants et jauges de contrainte

Il ne s'agit pas à proprement parler de tests de contrôle mais plutôt d'un moyen d'étudier la forme idéale à donner aux prothèses. Dans l'industrie ces procédés sont systématiquement employés pour savoir où doivent être placés des renforts, des nervures, c'est-à-dire les endroits où les forces ou composantes de forces s'appliqueront.

Nous avons vu ces tests dans l'industrie aéronautique pour l'étude des trains d'atterrissage et dans l'industrie automobile pour l'étude d'un carter de boîte de vitesse.

Le vernis craquelant est un mélange à base de colophane et de gomme Dammar. Il est étalé sur la pièce en une épaisseur de 2 à 4 centièmes de mm. C'est dire qu'il faut au technicien une grande habitude pour étaler ce vernis au chalumeau. La température doit être constante à 35° pendant la durée de l'essai sous peine de voir le vernis se craqueler tout seul. La pièce est vibrée comme on le désire et les endroits où le vernis se craquelle visualise les composantes des forces. C'est là qu'on fera les nervures.

Les jauges de contraintes servent davantage aux essais de flexion ou de dilatation. Une bande de papier très fin et très collant, englobant une résistance électrique très fine, est collée sur la pièce. On place plusieurs de ces bandes, soit parallèles, soit en V, soit perpendiculaires. Ces résistances sont branchées sur un pont de wiston mis au zéro.

L'allongement éventuel du fil inclus augmentera sa résistance dont on lira l'augmentation grâce au pont de wiston.

Les jauges de contraintes sont très employées dans nos laboratoires de recherche et dans l'industrie.

V - Les rayons Y

Les sources en sont des radioisotopes artificiels comme le cobalt 60, l'iridium 192, le Caesium 137, le Thalium 170. Ils sont utilisés de deux façons :

1) Gammagraphie : Les rayons Y passent à travers l'échantillon et viennent impressionner une plaque photographique, un écran fluorescent, ou sont révélés par xérogaphie. Les rayons qui rencontrent un manque de matière (retassure, soufflure, porosité, fissure, géode, etc..) ou une inclusion (scorie, laitier) ont moins d'épaisseur à traverser et impressionneront davantage l'élément révélateur.

2) Sondage gammascopique : Le principe d'émission est le même mais le principe de détection est différent : c'est un compteur à scintillations relié à un intégrateur qui transmet les valeurs des taux de comptage à un enregistreur.

La source utilisée par exemple dans l'appareillage que préparent "les ateliers de montage électrique" pour le contrôle en sortie de blooming est au radio-cobalt et sa puissance sera de mille curies ! Cet appareil sera en service au cours de 1970. Cet ensemble sera capable de tester efficacement des brames de 75 mm jusqu'à des blooms de 500 mm d'épaisseur.

C'est dire combien ce test est éloigné de nos problèmes.

VI - Radiographie

Comme pour les microscopes il nous semble inutile de rappeler le principe de la radiographie ni le fonctionnement des appareils.

Nous avons essayé, avec notre appareil de cabinet de prendre des clichés de telle ou telle prothèse sans obtenir de résultat probant. La puissance est alors trop petite et les essais n'avaient pas été menés systématiquement.

Il y a un monde entre notre source dentaire et le dernier né des laboratoires "Eatelle Northwest" de Richland. Ce dernier se présente comme une caméra portative alimentée en neutrons par un isotope radioactif, le Californium 252, et donne des radiographies permettant de distinguer différents métaux à l'intérieur d'un cylindre de métal ou de déterminer la nature des inclusions au sein d'un alliage !

Nous n'en sommes hélas pas là dans la pratique courante, mais entre notre appareil dentaire de faible puissance et cette dernière merveille Américaine se place une possibilité réelle,

employée, mise au point, grâce aux travaux de MM. CAITUEOLI et TARAYRE de Bordeaux.

Tout ce qui suit au sujet de la radiographie est soit inspiré des conversations de vive voix, soit copié dans le résumé d'une de leurs conférences. La radio de la photo n°3 nous a été aimablement confiée par eux.

Leur étude systématique permet de connaître à l'avance les paramètres désirés pour prendre une radio de prothèse : intensité, distance, épaisseur, etc...

Ainsi le praticien, pour peu qu'il puisse disposer d'un appareil de radiologie de type hospitalier peut, grâce à cette étude prendre des radios avec un minimum de tâtonnements.

Les auteurs utilisent uniquement des écrans de plomb. "Le film est placé dans une cassette d'aluminium entre deux écrans de plomb, un écran antérieur de 0,05 mm et un écran postérieur de 0,10 mm. L'effet renforçateur est d'autant plus grand que ces écrans sont employés avec des émulsions à grain plus fin et par conséquent à sensibilité plus faible".

Le noircissement de la radio sera inversement proportionnel à l'épaisseur du métal.

"La mesure en est effectuée par une opération densitométrique. On mesure à cet effet le rapport de la lumière incidente sur la lumière transmise. On appelle densité du film le logarithme décimal de ce rapport".

Ce qui nous donne de très belles courbes, faciles à interpréter et grâce auxquelles on peut déterminer d'un coup d'oeil les paramètres.

Ces courbes appelées "caractéristiques sensitométriques de l'émulsion" sont obtenues en portant en ordonnée les densités de noircissement et en abscisse les logarithmes des expositions relatives.

Selon la pente de ces courbes on parle de film rapide, à faible contraste, rapidité moyenne, film lent à grain fin et contraste élevé.

Pénétration des rayons X

"Pour étudier la pénétration des rayons X en fonction de la différence de potentiel et de l'exposition au travers d'une épaisseur donnée d'un métal donné, on utilise un pénétrateur à gradins. Ce dernier est réalisé en superposant par exemple des bandes découpées dans une feuille de l'alliage à étudier, de telle sorte que l'on obtienne une succession de gradins. On prend alors une succession de clichés à différence de potentiel constante, en faisant varier les expositions données en milliampère/S. On renouvelle en faisant varier les différences de potentiel" (radio n°3).

On voit alors qu'une plage exploitable existe entre les courbes de densité maxima et minima.

Seuil de détection

Quel est le plus petit défaut que l'on peut détecter avec un appareil d'une puissance déterminée, avec telle émulsion, etc ... ?

"Pour le savoir, on place dans une région du matériau examiné un dispositif appelé indicateur de qualité d'image, créant une variation d'absorption de valeur déterminée en recherchant la dimension limite susceptible d'être mise en évidence.

Nous avons choisi d'exécuter un IqI additif à fil, d'un modèle comparable à ceux utilisés en Allemagne. Entre 2 plaques de Plexiglas, d'absorption négligeable, par rapport au métal, nous interposons un réseau de fils de métal de même nature que l'alliage à examiner, fils calibrés par passage à la filière puis par traction pour obtenir une échelle progressive allant de 0,04 mm à 0,25 mm. L'image de l'IqI à fils se superpose à l'échantillon à étudier et permet de déceler la sensibilité de détection en recherchant quel est le diamètre du dernier fil visible sur l'image radiographique de l'objet".

Ceci permet de définir l'indice de sensibilité. On part d'un IqI à dix échelons en progression géométrique de raison.

Pratiquement

Les sources disponibles en milieu hospitalier (et à plus

forte raison chez un radiologue) permettent une investigation allant jusqu'à plusieurs millimètres d'épaisseur d'alliage.

L'image n°3 est la radio d'une double plaque de stellite dont l'aspect extérieur est parfait et dont la technique de coulée fut parfaite ... Les taches sombres sont des retassures et les taches claires sont des zones d'alliage plus denses.

Plus que de longs discours cette radio montre quels services peut rendre cette technique à la condition de suivre une méthode.

VII - Le Ressuage - Base de nos expériences -

C'est une méthode de contrôle non destructif des pièces métalliques ou non, basée sur la capillarité. C'est une des plus anciennes méthodes utilisées dans l'industrie et qui permet de déceler d'une façon très fine les défauts débouchant à la surface.

Toutes nos expériences portent sur cette méthode, c'est dire que nous n'avons rien inventé. Cependant il ne nous semble pas que le ressuage ait été utilisé systématiquement dans notre profession au stade de la prothèse terminée ou de la prothèse usagée.

Notre attention a été attirée par l'énorme usage qu'en font les industries de pointe (la partie avant du train d'atterrissage du Concorde par exemple) ainsi que les industries traditionnelles. Nous avons constaté que la SNCF passe systématiquement au ressuage les raccordements entre toile et jante de ses roues de wagon et que la RNUR l'emploie pour toute pièce de fonderie semi-usinée sur la perfection de laquelle on a un doute (en dehors des pièces de haute sécurité qui passent systématiquement à la magnétisation).

C'est ainsi que nous avons suivi par deux fois le contrôle par ressuage de blocs-moteurs de tracteurs ; la zone à étudier était indiquée par le service demandeur et mesurait environ 10 cm sur 5 cm.

A/ Ressuage simple

1) à froid : c'est de loin la technique la plus courante.

On répand à la surface de la pièce à tester un liquide "mouillant" c'est-à-dire à faible tension capillaire, qui pénètre facilement dans les moindres cavités ou fentes. Le liquide est laissé quelques temps pour qu'il puisse s'infiltrer dans les défauts recherchés. Puis la surface est essuyée ou lavée suivant le mouillant employé, soit à l'eau, soit avec un dissolvant spécial.

On enlève ainsi tout le liquide, sauf ce qui a pénétré dans les fissures ou autres défauts où le lavage n'a pas accès. Cela s'applique également à tous nos types de prothèse.

A ce stade, les défauts seulement visibles à la loupe sont déjà visibles à l'oeil nu et c'est déjà un avantage. On fait ensuite apparaître le ressuage non visible après simple lavage. Pour ce faire on recouvre la surface d'une pellicule blanche qui boit le liquide coloré là où il est resté, c'est-à-dire à l'aplomb des fentes.

Cette pellicule est souvent du talc en poudre ou de la silice colloïdale. On peut aussi employer d'autres produits révélateurs, par exemple de la craie en suspension dans l'alcool éthylique. Les fabricants qui se disputent le marché sont, bien entendu, très discrets à ce sujet. L'important est que ce produit fasse office de buvard.

Le premier liquide, le mouillant, est encore plus secret. Nous pensons qu'est encore employé un mélange de Tétraline et de Xyline additionnés d'un peu d'alcool propylique et coloré par dissolution de 1 % de rouge organol.

On doit attendre une ou deux minutes avant de voir apparaître nettement le liquide rouge à travers le blanc. Pour les fissures les plus fines il faut parfois attendre un quart d'heure.

Cette méthode permet déjà de détecter des fissures dix fois plus fines que celles détectées par une loupe puissante.

2) à chaud : Le résultat en est encore plus fin : la pièce est chauffée puis les deux produits sont appliqués successivement comme d'habitude. En chauffant, la fissure s'est dilatée, acceptant davantage de mouillant qui se trouve d'autant plus ressué qu'au refroidissement la fissure se contracte.

Malgré cet avantage, la technique à chaud est peu employée : d'abord elle ne s'applique qu'aux métaux. Ensuite l'industrie se contente du ressuage simple ou bien passe aux tests magnétiques et aux ultra-sons.

Quant à nous, nous passons au ressuage fluorescent qui dépasse de toutes façons la finesse des deux dernières méthodes.

B/ Ressuage fluorescent

Le mouillant contient un liquide fluorescent qui est un colorant organique. Après séchage et application ou non de révélateur suivant les cas, la pièce est examinée sous lumière noire produite par une lampe de wood. Les défauts apparaissent alors en brillant sur fond sombre.

La lampe de wood produit des radiations invisibles de courtes longueurs d'ondes appartenant au domaine de l'ultra violet et voisines du spectre visible. Ces radiations sont obtenues en filtrant la lumière provenant d'une lampe à vapeur de mercure au moyen d'un verre de wood à l'oxyde de Nickel qui arrête les radiations lumineuses et ne laisse passer qu'une région du spectre ultra violet (bande intense entre 3 663 et 3 650 Å et une raie à 3 346 Å).

Pourquoi le ressuage en art dentaire ?

D'abord parce que la technique en est très simple, comme nous l'avons vu. Les produits : un flacon de mouillant rouge, un flacon de mouillant fluorescent, un révélateur utilisable pour les deux méthodes et qui se présente soit en liquide, soit d'une façon plus pratique : en bombe à pulvériser. Deux pinces, l'eau courante, une lampe de wood.

Cette dernière peut se présenter comme une lampe de bureau et par conséquent prendre place dans un cabinet dentaire sans en déparer l'harmonie. Il y a des lampes à tous prix. Disons que pour notre usage son prix, augmenté du prix des produits, n'excède pas D 200.

A l'intérieur de ses limites la méthode est extrêmement précise. Ses limites sont faciles à définir : le ressuage détecte les criques, fissures, porosités de surface, etc.. autrement dit toute imperfection de surface ou toute solution de continuité débouchant à la surface.

C'est dire qu'elle est inopérante en ce qui concerne les imperfections uniquement internes et à plus forte raison de structure.

Nous verrons, à la lumière de nos expériences, que les imperfections de surface non détectables à l'oeil nu sont légions et que c'est à leur niveau que la prothèse casse le plus souvent.

Sa précision est de l'ordre du micron. Elle n'atteint pas la finesse du microscope électronique et ne donne que l'indication d'un défaut et non sa nature. Toutefois la simplicité du ressuage est telle que nous ne pouvons le comparer aux autres méthodes.

Parmi les contrôles non destructifs, le ressuage est le seul qui soit :

- à la portée de nos moyens financiers
- à la portée de quiconque n'est pas technicien
- valable pour toutes sortes de matières à la condition qu'elles ne boivent pas le mouillant. C'est le cas de tous nos matériaux prothétiques.
- d'un encombrement insignifiant, utilisable partout
- les résultats en sont visibles par tous, y compris par nos patients
- qui permette donc de tester toutes les prothèses qui passent entre nos mains, depuis la prothèse neuve à placer en bouche, fixe ou mobile, jusqu'au vieux "dentier" à réparer sur lequel nous allons détecter nombre de fissures ou fêlures qu'on peut si on le désire montrer au patient.

Ajoutons que sans aucune préparation la lampe de wood procure déjà de belles satisfactions. Qui n'a pas eu l'occasion de voir en lumière noire les dents, les ongles, un col de chemise ? l'effet est saisissant. Bien plus saisissant encore est l'effet produit en plaçant sous la lampe une prothèse mobile portant à la fois des dents résine et des dents porcelaine : les dernières apparaissent comme des masses noires tandis que les dents résine sont presque invisibles à force de transparence, à peine une coquille d'oeuf.

Les réparations, les adjonctions, apparaissent avec une netteté insoupçonnable et telle prothèse usagée que l'on voit pour la première fois vous livre en bloc son histoire et ses faiblesses.

A plus forte raison le ressuage a sa place au laboratoire de prothèse où le technicien peut ainsi juger du bien-fondé d'une réparation, de la perfection de la pièce qu'il vient de façonner, voire des matériaux livrés par le fabricant.

CHAPITRE IV

-:-

EXPERIENCES

-:-

A - La démarche

Avant de commencer nos travaux pratiques un double problème s'est posé : problème d'efficacité et d'honnêteté.

En effet, en abordant des expériences, l'état d'esprit peut être différent : ou bien on expérimente un peu au hasard en attendant que se dégage une idée directrice, les résultats qui se recoupent amènent alors par analyse à chercher dans telle ou telle direction. Ou bien on veut prouver quelque chose et l'on dirige les expériences qui, par synthèse, doivent mener à un résultat.

Sans doute la plupart des expérimentations procèdent-elles des deux méthodes et ce fut bien le cas pour nous. Attiré depuis longtemps par la structure des matériaux, nous avons observé en vrac tel échantillon métallique au microscope, telle résine à la loupe, telle porcelaine au microscope électronique, etc... bien entendu sans rien découvrir qui ne fut déjà décrit dans les bons ouvrages.

Les circonstances nous ayant fait visiter les bureaux d'étude d'une grande firme puis différents contrôles, nous avons jaugé la différence entre les énormes moyens automatisés ou non, de l'industrie, et nos pauvres moyens de détection qui ont généralement pour noms l'oeil et la loupe.

Le problème s'est alors posé de savoir ce que nous pouvions prendre facilement et immédiatement à l'industrie. Derrière les énormes chaînes de magnétisation ou d'ultra-sons, nous avons trouvé l'homme seul, armé de son petit pinceau dans une petite pièce, faisant son petit travail : le ressuage.

Photo A

Photo B

Photo C

Photo D

Photo E

Photo F

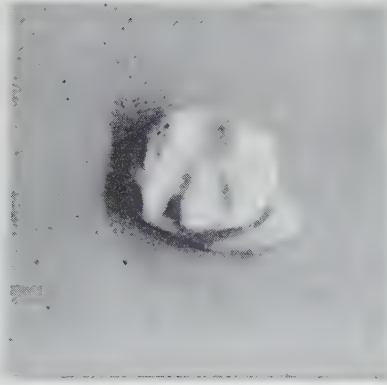
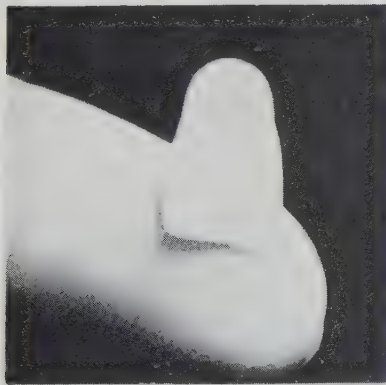
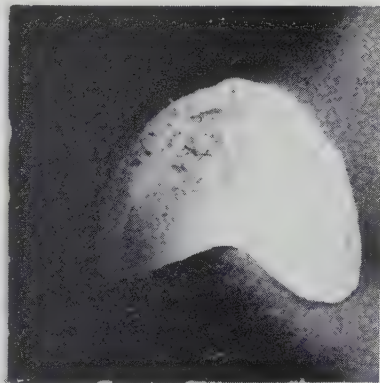
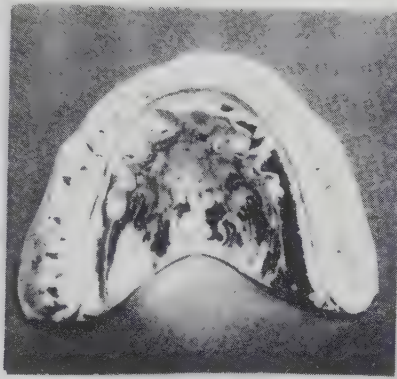
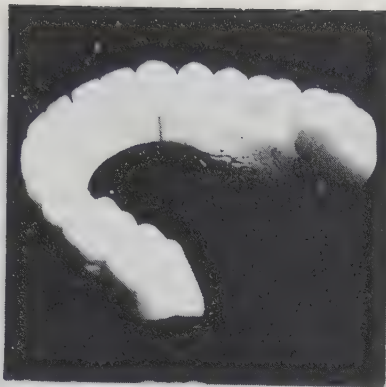
Photo I et G

Photo H

Photo I

Photo K

Photo L



Nous avons vu comment se pratiquent les ressuyages. Les défauts débouchant à la surface étant détectés, il convenait de savoir dans quelle mesure ils étaient des amorces de fracture.

Dans la pratique, ce qui est primordial est de savoir si telle prothèse tiendra ou non, c'est-à-dire quel défaut est acceptable ou non.

Pour ce faire nous avons procédé à des essais de fatigue, déterminant après bien des tâtonnements les paramètres permettant de juger la fragilité d'une prothèse.

B - Essais de fatigue

Il s'agit de recréer artificiellement les efforts subis par une prothèse au cours d'une vie. Bien entendu l'étude de la possibilité de cassure doit être assez brève pour qu'on puisse en observer les résultats. De plus, les circonstances, la fréquence des chocs, les axes de pression, le milieu, seront différents.

Nous avons dû abandonner la notion de milieu pour des raisons pratiques, d'autant que la relative brièveté des expériences rendrait inopérante l'action corrosive d'un milieu comparable à la salive. Nous en tiendrons compte cependant dans la discussion des résultats.

Le nombre de chocs subit par la prothèse a été fixé à 4 320 000, ce qui correspond grosso-modo à l'utilisation d'une prothèse durant quatre ans. M. PIERSON, en 1950, admettait davantage de mastications par an. Mangeait-on plus alors ou mastiquait-on davantage ?

Toujours est-il que pour nous, toute prothèse ayant subi sans dommage ce nombre de chocs ne cassait pas après, aussi longtemps que l'on poursuivait l'épreuve.

Le matériel

L'essai industriel par flexion rotative nous a paru inadapté. Les chocs en bouche sont positifs et l'effort négatif n'intervient que par retour élastique. Les éventuelles distorsions sont bénignes et de toutes façons ne peuvent qu'être le

fait d'une mauvaise conception dans l'espace et sortent alors de notre étude.

Nous avons donc simplement mis au point un instrument portant des chocs verticaux. Un moteur électrique transmet à l'aide d'un arbre à cames un mouvement linéaire alterné à une petite masse métallique.

La fréquence des chocs est de 50 par seconde, ce qui produit 4 320 000 chocs en 24 h. L'essai en cours permet de vaquer dans une autre pièce car si la prothèse casse, le bruit du marteau devenu "fou" attire suffisamment l'attention ... même pendant le sommeil.

C - Les tests

Mis à part les échantillons examinés en vrac, de tous matériaux dentaire ou non, soit à la loupe, au ressuage, au microscope métallographique ou électronique, nous avons fait l'essai complet et systématique de 137 prothèses, neuves ou non, menant les essais depuis l'examen à l'oeil jusqu'au test le plus fin, examinant parfois les bords de cassure au microscope. Il nous a semblé logique de présenter seulement quelques cas parmi les plus typiques et de les classer par matériau.

Test n°1

nature de la pièce : complet bas résine neuf. Dents antérieures en résine - Dents postérieures en porcelaine. Fil métal renforteur

à l'oeil : RAS

Loupe : RAS

Examen sans préparation sous lampe de wood : normal, les antérieures sont presque invisibles, et les postérieures noires.

Ressuage simple : le mouillant est étalé au pinceau sur toute la surface et laissé deux minutes. Lavage, essuyage au chiffon sec. RAS, on ne remarque rien de plus qu'avant. Révélateur en bombe par pulvérisation à 30 cm pendant 2 à 3 secondes.

Au bout de 3 minutes apparaît une bande rouge à l'aplomb de  sur la face linguale depuis le collet jusqu'à 3 mm du bord inférieur (voir photo B). La bande a 1 mm de large mais le révélateur faisant buvard, la fissure est bien entendue beaucoup plus fine puisqu'elle était invisible à la loupe.

Essai de fatigue : Le complet tenu en 7 et vibré en subit logiquement le maximum de contrainte au centre. Or le complet a cassé en 5 h ½, soit après 990 000 vibrations à l'endroit exact de la fêlure détectée.

La fêlure avait alors progressé d'une part jusqu'au bord inférieur et d'autre part le long du fil-renfort vers les incisives. Le fil est tenu dans la partie la plus importante mais coulisce dans sa gorge en 5 et 6 .

Encore un exemple de fil renforçateur qui ne renforce rien, bien au contraire.

Test n°2

nature : Partiel du bas résine, porté 6 ans, comprenant toutes les dents sauf 7 et 7 (photo C).

à l'oeil : vision excessive des queues d'arondes de crochets par transparence - une plaque de tartre, linguale antérieure.

loupe : rien de plus.

Ressuage simple : Mouillant pendant 2 minutes sur toute la surface. Lavage, séchage, révélateur.
Après 1/4 d'heure : RAS.

Ressuage sans lampe de wood : lavage du révélateur, séchage prolongé au jet d'air. Mouillant fluorescent, séchage, révélateur. Après 5 minutes apparaît une ligne nette verticale à l'aplomb de l'interdent 12 (photo d). On remarque en plus une tache fluorescente sur la face linguale de ces deux dents ; c'est un artefact provenant d'un lavage insuffisant.

Fatigue : toujours tenue de la même façon, la prothèse a cassé très rapidement à l'endroit exact de la fissure détectée : 2 heures juste, soit après 3 600 000 vibrations.

Test n°3

nature : Partiel haut usagé résine portant 741 1235 et de nombreux crochets.

oeil : par transparence on voit une amorce de fissure au niveau de l'insertion du crochet sur 3 au niveau de 4 .

loupe : rien de plus.

wood sans préparation : toutes les dents sont en résine. On remarque de plus que 2 dents ont été remises au moins une fois.

Ressuage simple : mouillant 2 minutes, lavage. Aussitôt la fissure est marquée très nettement sans qu'il soit besoin de passer le révélateur.

Par contre, après révélateur, la fissure semble s'étendre beaucoup plus loin, jusqu'à 2 mm du bord palatin.

Fatigue :

1er essai : le partiel, tenu en 7 et vibré dans la région de 7 , malgré la fissure détectée en transparence n'était pas cassée au bout de 24 h. Nous nous sommes évidemment demandé pourquoi. Cette expérience était à peu près la centième et nous avions pris l'habitude de prévoir grosso-modo, suivant l'aspect et l'importance des fissures, l'heure de la fracture de la pièce. Cette sorte de pari avec nous-même apportait un élément de "suspens" qui rompait un peu la monotonie des chocs répétés.

Nous avons alors pratiqué un autre ressuage qui nous a montré la même fissure aucunement aggravée. Donc, non seulement il n'y avait pas eu cassure, mais contrairement à l'habitude la fêlure ne s'était même pas aggravée !

2e essai : Nous avons cherché ce qui différait des autres cas. La seule différence, mais de taille, était dans l'orientation de la fissure.

Alors que nous avions jusqu'alors détecté des fissures perpendiculaires à l'axe de la prothèse, celle-là était très oblique.

Nous avons donc laissé la maintenance en 7 mais vibré en 3 de telle sorte que la fissure coupe perpendiculairement une ligne maintenance-vibration.

La pièce a cassé en 45 minutes ! (135 000 vibrations)

Test n°4

nature : Plaque haut complète métal - Le patient étant devenu indisponible les dents n'ont jamais été montées (photo E).

oeil et loupe : RAS

Ressuage simple : RAS

Ressuage wood : une plaque de porosités apparaît à l'aplomb de 34 | 30 secondes après le passage du révélateur. On remarque en plus en artéfact une grande plage de révélateur mal lavé (photo F).

Fatigue : la plaque n'a pas cassé malgré 3 orientations différentes et successives de vibrations.

Test n°5

nature : Plaque estampée acier haut de cinq dents antérieures avec contreplaques.

oeil et loupe : RAS

Ressuage simple : Belle image venue en 5 minutes après révélateur d'une fissure de 3 mm de long, inter-incisive.

Fatigue : Au bout de 24 h la pièce n'est pas cassée ... mais : un nouveau ressuage montre que la fissure atteint 5 à 6mm et cela après 2 minutes seulement de révélateur, ce qui montre que la fissure s'est également élargie.

Microscope : l'étude des bords de la fissure montre un profil déchiré et non pas une coupure nette.

Test n°6

nature : squeletté haut stellite 2 | 467 avec barre palatine.

oeil et loupe : RAS

Ressuage simple : RAS

Ressuage wood : 3 minutes après révélateur on voit de nombreuses porosités sur toute la barre palatine côté poli et quelques piqûres isolées sur les autres parties polies.

Fatigue : RAS.

Test n°7

nature : Une centrale haut résine du commerce, prête à la mise en mouffle (photo G).

oeil et loupe : RAS

Ressuage simple : RAS

Ressuage wood : 1 minute après révélateur apparaît une ligne nette délimitant l'angle mésial ainsi qu'une plaque de porosités à l'intérieur de cette surface (photo H).

Fatigue : Il semble que les vibrations n'engendrent pas de cassure. Par contre la flexion ou les micro-chocs répétés amènent rapidement la cassure.

Nous avons mis au point pour l'essai des dents isolées un système genre sonnette électrique amenant sur une surface de $2, \text{mm}^2$ 50 microchocs par seconde.

La cassure arrive en des temps très variables suivant l'ampleur du mouvement de frappe c'est-à-dire la distance dent-sonnette. Il est donc difficile de calculer la puissance de la frappe et l'on ne peut obtenir que des résultats comparatifs.

Test n°8

nature : centrale haut résine du commerce

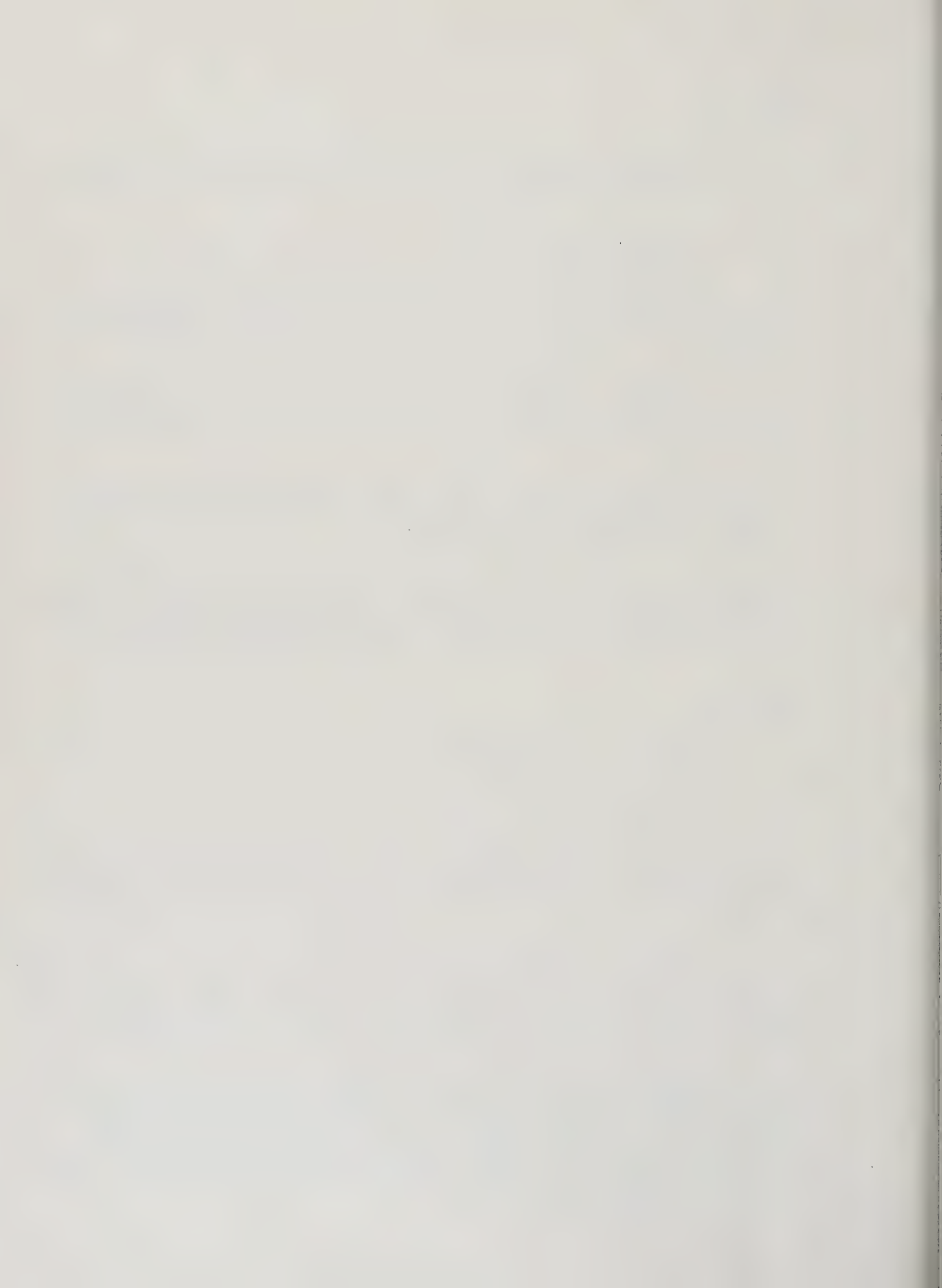
œil et loupe : RAS

Ressuage simple : RAS

Ressuage wood : après 1 minute apparaît une fissure verticale depuis le bord triturant jusqu'au tiers de la hauteur. Cette fissure se présente comme une ligne de points (photos i et j).

Fatigue : Les chocs portés de part et d'autre de la fissure ont montré une plus grande résistance de la dent que dans le test n°7. La fracture s'est d'ailleurs produite sur une partie seulement de la fissure, empruntant après un autre chemin.

Microscope : Nous avons heureusement (et par hasard) examiné cette dent au microscope simple avant l'essai de fatigue. Cet examen nous a montré qu'il ne s'agissait pas d'une véritable fissure mais d'une suite de porosités de surface n'intéressant pas les plans profonds, ce qui explique la cassure tardive et dans un autre axe.



Tests négatifs

Ce sont tous les tests sur dents en porcelaine dans lesquelles le ressuage n'a jamais montré de porosité, ce qui confirme la théorie avancée au chapitre "défauts de la porcelaine".

C'est aussi par exemple cette couronne acier, usée et présentant de nombreuses rayures. Nous pensions qu'il s'agissait d'autant d'amorces de fissures. Il n'en fut rien et le ressuage de wood se montra négatif (photos K et L).

D - Discussion des expériences

Il eût été trop long et sans intérêt de décrire tous nos essais. Les 8 tests décrits sont les cas les plus typiques et divers mais pas forcément les plus rapides. Le ressuage fut parfois d'un effet plus foudroyant mais alors la cassure survenait trop vite ; ou bien le ressuage montrait une micro-fissure mais il y avait ailleurs une macro-fissure, visible à la loupe, et bien entendu c'est là que la prothèse cassait.

Pourtant quelques idées directrices ressortent de nos expériences et même des seuls tests ici présentés.

D'abord la résine est la matière la plus sensible au ressuage. Ses fissures les plus infimes prennent le mouillant parce que son épaisseur est toujours plus grande que celle d'une plaque métal pour laquelle le lavage enlève parfois en partie le mouillant dans les fissures tant celles-ci sont peu profondes.

La résine est le matériau de choix pour l'examen direct sous lampe de wood sans préparation ; aucune adjonction, réparation, zone d'usure ne peut échapper au premier regard.

Pour tous les matériaux le ressuage simple qui suffit le plus souvent à la détection des criques, est avantageusement remplacé par le ressuage sans lampe de wood dans la recherche des porosités.

La recherche des fissures dans la porcelaine est un peu décevante. Or les fissures devraient s'y montrer plus nombreuses que pour les dents en résine en raison des tensions de cuisson. Sans doute peut-on donner l'indication suivante : le glaça-

ge de la dent obstrue finement en surface les fissures qui pourtant existent.

Quant au métal, la détection des porosités est rare sur les surfaces polies et impossible sur les surfaces non polies. En effet, ou bien le passage de la brosse et de la pâte ferme la porosité ou bien celle-là se confond avec la micro-infractuosité du métal non poli. Les fissures, par contre, seront à tout coup révélées au ressuage sous wood.

A l'essai de choc le métal ne casse pas dans les limites de nos tests, toutefois la longueur de la fissure augmente parfois.

A l'examen microscopique, les bords de la fissure sont déchiquetés, contrairement à ce que l'on observe en cas de fracture par pliure à l'étai par exemple, ce qui montre bien qu'à l'origine de chaque fissure réside une anomalie du réseau.

Les rares porosités observées sur les pièces coulées avec les techniques modernes et le fait que les fissures ne semblent pas réduire de beaucoup la résistance aux chocs ne veut pas dire que la prothèse résistera à l'usage en bouche. Ce serait méconnaître l'énorme importance de la corrosion par le milieu buccal et la théorie des couples différentiels. La moindre porosité contiendra un milieu moins aéré que le reste et le couple ainsi formé entraînera la perforation de la plaque.

Il faudrait mener les expériences pendant des années pour obtenir des chiffres, mais de toutes façons chacun connaît l'importance de ces phénomènes au niveau des prothèses métalliques (voir le paragraphe I, C, Chapitre II).

Le test 3 nous montre combien est important l'emplacement des fissures. La fissure la plus dangereuse sera toujours celle qui est perpendiculaire à l'axe de la force.

Si l'appareil est métallique, la fissure entraînera toujours à plus ou moins brève échéance la cassure par perforation en vertu de la loi d'Evans. Si la prothèse est en résine, une fissure dans l'axe de la ligne de force principale peut rester sans danger très longtemps.

En ce qui concerne les produits employés pour le ressuage, les révélateurs disparaissent instantanément par simple passage sous le robinet. Par contre, si le révélateur fluorescent, presque incolore, s'élimine bien et ne laisse pas de trace, le révélateur pour simple ressuage est d'un rouge assez tenace et s'élimine assez difficilement. C'est encore un point pour le ressuage sous lampe de wood.

CONCLUSIONS

-:-

Comme le titre, notre conclusion aura deux volets : théorique et pratique.

L'étude de la structure de la matière en général et de nos matériaux en particulier, présente en fait un côté pratique certain.

Nous n'agissons plus de la même façon à la pince sur un crochet de partiel depuis que nous avons en tête la théorie assez moderne des plans de glissement issue des indices de Miller.

La connaissance des différentes solutions cristallines nous fait agir avec plus de prudence, plus d'amitié et plus d'intérêt sur les différentes prothèses métalliques, de la même façon qu'un médecin "visualise" les organes du malade.

La théorie d'Evans nous met constamment en garde contre les petites inclusions ou simplement les logettes parce que ce n'est pas une notion apprise comme un dogme mais que nous en avons démonté le mécanisme.

Nous nous intéressons davantage au choix du matériau de prothèse parce que nous les connaissons bien dans leur intimité et que nous savons les faiblesses de ceux qui sont réputés les plus forts.

Nos instruments bénéficient d'un meilleur traitement, tant pour leur utilisation que leur stérilisation.

Nous pouvons dire à notre prothésiste pourquoi tel défaut en apparence bénin est en fait grave, pourquoi il s'est produit et comment l'éviter car, s'il pratique souvent mieux que nous, nous connaissons le mécanisme des règles qu'il observe.



Faut-il ajouter combien il est utile de pouvoir parler structure aux représentants des fabricants ? s'ils peuvent nous répondre, un dialogue fructueux s'engage qui nous évite de prendre des produits inutiles.

Le volet immédiatement pratique est la technique du Ressuage. En effet toutes les autres méthodes non destructives pour contrôler nos prothèses sont pour le moment et pour longtemps encore inutilisables dans notre art - ou bien le matériel est trop important ou bien la méthode ne peut s'appliquer qu'à l'acier et en chaîne, ou bien la technique dépasse nos connaissances, et le plus souvent tous ces défauts à la fois. Exception peut-être pour la radiographie qui toutefois ne s'applique qu'aux métaux mais qui, à la condition de jouir d'une source puissante, donne de beaux résultats. Hélas ce n'est presque jamais le cas dans nos cabinets.

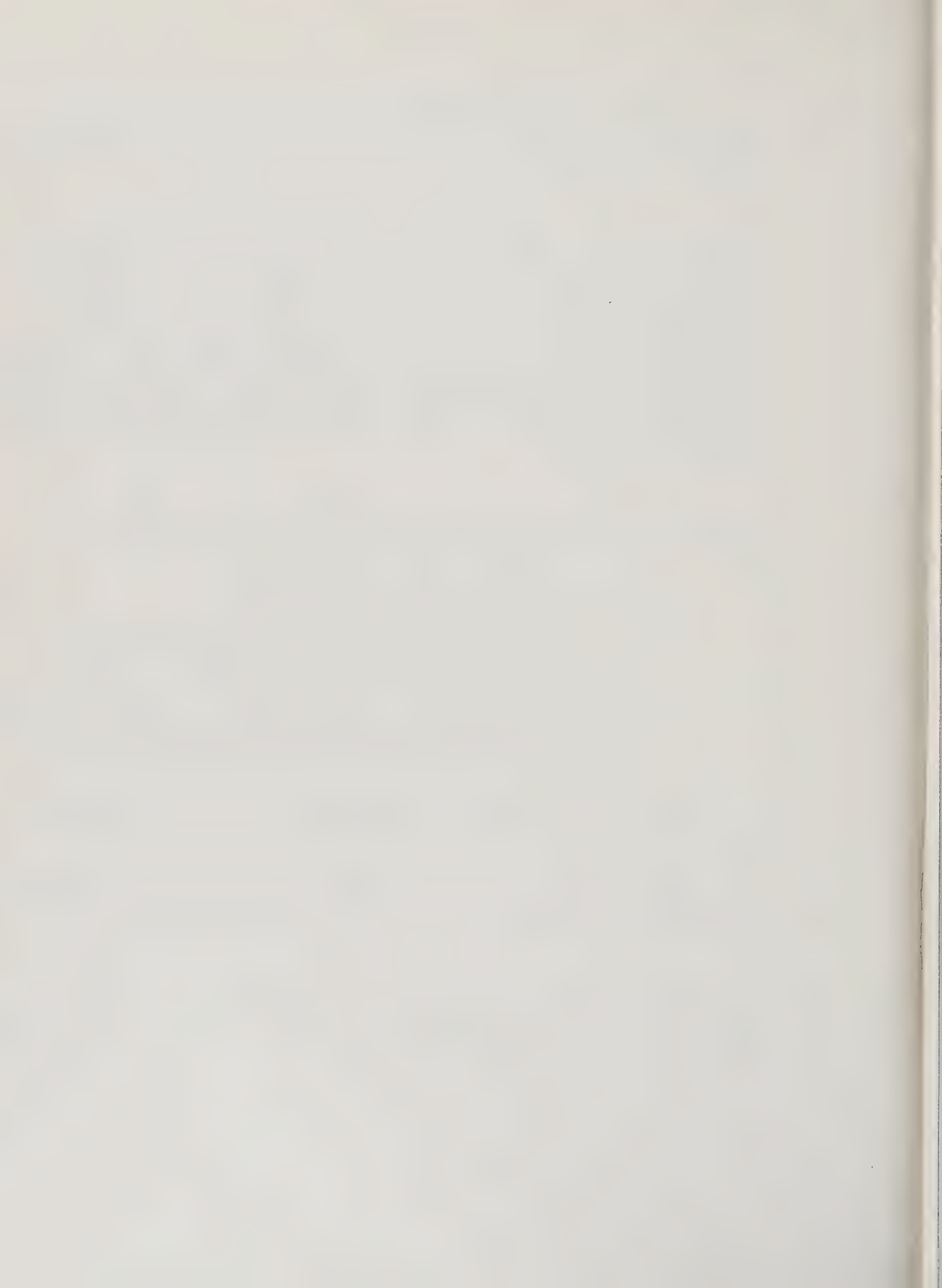
La méthode systématique de Ressuage sous lampe de wood que nous préconisons présente les avantages suivants :

- Elle s'applique à tous nos matériaux
- Elle réclame un matériel très simple
- Elle est d'une technique très simple
- Elle peut s'appliquer dans le cabinet dentaire même
- Les résultats sont connus immédiatement et visibles par tous
- Elle est très rapide. Depuis le simple examen sans préparation qui dure quelques secondes, jusqu'au ressuage complet qui demande au maximum dix minutes.

La méthode a cependant une limite : elle ne détecte que les défauts débouchant à la surface.

Nous pensons que cette méthode, utilisée dans l'industrie depuis longtemps mais dont la finesse des produits n'a cessé d'augmenter, est maintenant très utilisable pour notre art.

La lampe de wood et les produits annexes vont devenir sous peu, nous le souhaitons, aussi indispensables en cabinet pour celui qui fait de la prothèse que l'est l'appareil de radio pour celui qui fait des soins.



Vu :

Le Président :

Signé : P. CERNEA

Vu :

Le Doyen honoraire

Administrateur provisoire
de la Faculté de Médecine :

Signé : G. BROUET

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris

Signé : R. MALLET

BIBLIOGRAPHIE

-:-

- Colloques de Bâle (1965) et de Bilbao (1966) sur le contrôle non destructif des métaux.
- Les Colloïdes - M. BONNEMAY (1967).
- Matières Plastiques - J. JOUSSET (1961)
- Traité de métallurgie structurale - De SY et VIDTS (1962)
- Métallurgie - R. CAZAUD -(1957)
- The science of Dental materials - Skinner and Phillips - (1967)
- Métallurgie - CHAUSSIN et HILLY (1953)
- Technologie pour les mécaniciens - A. CAMPA (1968)
- Métallotechnie - M. PIERSON (1950)
- Matériaux et Alliages dentaires - J.N. NALLY (1964)
- Chimie - Ch. BARTHE (1966)

